



UNIVERSIDAD DE JAÉN  
*Escuela Politécnica Superior de Jaén*

## Trabajo Fin de Grado

# CONTROL DE DEFORMACIONES DE LA PRESA DEL ARENOSO (CÓRDOBA)

**Alumno: Juan Pedro Cano Córdoba**

Tutores: Prof. Dña. M. Clara de Lacy Pérez de los Cobos  
Prof. Don Antonio J. Gil Cruz

Dpto: Ingeniería Cartográfica, Geodésica y  
Fotogrametría

**Septiembre, 2016**



Universidad de Jaén  
Escuela Politécnica Superior de Jaén  
Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría

Doña M<sup>a</sup> Clara de Lacy Perez de los Cobos y Don Antonio J. Gil Cruz, tutores del Trabajo Fin de Grado titulado: Control de Deformaciones de la Presa del Arenoso (Córdoba), que presenta Juan Pedro Cano Córdoba, autorizan su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, 2 de septiembre de 2016

El alumno:

Los tutores:

Juan Pedro Cano Córdoba

M<sup>a</sup> Clara de Lacy Pérez de los Cobos

Antonio J. Gil Cruz



# Índice de Contenidos

|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Índice de Contenidos .....                                                     | i   |
| Listado de Figuras .....                                                       | iii |
| Listado de Tablas .....                                                        | v   |
| Agradecimientos .....                                                          | vii |
| Resumen .....                                                                  | ix  |
| 1.- Introducción .....                                                         | 1   |
| 2.- Contexto GPS .....                                                         | 3   |
| 2.1.- Sistemas y Marcos de Referencia.....                                     | 3   |
| 2.1.1.- International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS)..... | 4   |
| 2.1.1.1.- Earth Orientation Centre .....                                       | 5   |
| 2.1.1.2.- Rapid Service / Prediction Centre (RS/PC) .....                      | 7   |
| 2.1.1.3.- Conventions Centre .....                                             | 7   |
| 2.1.1.4.- Global Geophysical Fluids Centre (GGFC).....                         | 8   |
| 2.1.1.5.- ICRS Centre .....                                                    | 9   |
| 2.1.1.6.- ITRS Centre .....                                                    | 13  |
| 2.2.- Redes de Estaciones Permanentes .....                                    | 25  |
| 2.2.1.- International GNSS Service (IGS) .....                                 | 27  |
| 2.2.2.- Proyecto Topo-Iberia.....                                              | 30  |
| 3.- Presa del Arenoso .....                                                    | 33  |

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| 3.1.- Descripción de la presa .....             | 33 |
| 3.2.- Trabajos Previos.....                     | 36 |
| 3.2.1.- UTE Técnicas Reunidas – PYCSA .....     | 37 |
| 3.2.2.- Campañas de 2008 .....                  | 38 |
| 3.2.2.1.- Nivelación .....                      | 38 |
| 3.2.2.2.- GPS .....                             | 42 |
| 3.2.3.- Campañas de 2013 .....                  | 45 |
| 3.2.3.1.- Nivelación .....                      | 45 |
| 3.2.3.2.- GPS .....                             | 46 |
| 4.- Desarrollo del Trabajo .....                | 49 |
| 4.1.- Nivelación .....                          | 49 |
| 4.2.- GPS .....                                 | 57 |
| 4.2.1.- Software Bernese .....                  | 57 |
| 4.2.2.- Procesamiento UJA de Topo-Iberia .....  | 58 |
| 4.2.3.- Planificación y procesamiento TFG ..... | 60 |
| 5.- Análisis de Resultados y Conclusiones ..... | 65 |
| 5.1.- Nivelación .....                          | 65 |
| 5.2.- GPS .....                                 | 67 |
| 5.3.- Conclusiones .....                        | 76 |
| 5.3.1.- Nivelación .....                        | 76 |
| 5.3.2.- GPS .....                               | 76 |
| Bibliografía .....                              | 79 |

## Listado de Figuras

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.- Estructura del IERS (IERS, 2013).....                                  | 5  |
| Figura 2.- Ejemplo gráfico de productos del Centro de Orientación Terrestre ..... | 6  |
| Figura 3.- Ejemplo de modificaciones al Capítulo 5 de (IERS, 2010) .....          | 8  |
| Figura 4.- Distribución de fuentes “defining” en ICRF2 (ICRS, 2009) .....         | 12 |
| Figura 5.- Mapa de ubicaciones de BTS84 (BOUCHER, y otros, 1990) .....            | 15 |
| Figura 6.- Mapa de ubicaciones de ITRF2000 (ITRF, 2016) .....                     | 20 |
| Figura 7.- Mapa de ubicaciones de ITRF2008 (ALTAMIMI, y otros, 2011) .....        | 23 |
| Figura 8.- CGPS del Politécnico de Milán – Sede Como (BIAGI, 2009) .....          | 26 |
| Figura 9.- Estaciones permanentes de la Red IGS (IGS, 2016) .....                 | 28 |
| Figura 10.- Estación TGIL de la red Topo-Iberia (DE LACY, y otros, 2014) .....    | 31 |
| Figura 11.- Mapa de situación de la Presa del Arenoso .....                       | 34 |
| Figura 12.- Ortofotografía de situación de la Presa del Arenoso .....             | 34 |
| Figura 13.- Ortofotografía PNOA de la Presa del Arenoso .....                     | 35 |
| Figura 14.- Panorámica de la presa desde V-100 .....                              | 36 |
| Figura 15.- Gráfica de asentamientos iniciales (FRANCO-MORENO, 2009) .....        | 37 |
| Figura 16.- Resultados nivelación campañas 2008 para la línea A .....             | 40 |
| Figura 17.- Resultados nivelación campañas 2008 para la línea B .....             | 40 |
| Figura 18.- Resultados nivelación campañas 2008 para la línea C .....             | 41 |
| Figura 19.- Resultados nivelación campañas 2008 para la línea CI .....            | 41 |
| Figura 20.- Planta de las campañas GPS 2008 (FRANCO-MORENO, 2009) .....           | 42 |
| Figura 21.- Resultados planimétricos de la línea C en la campaña 2008 .....       | 45 |
| Figura 22.- Desplazamientos verticales entre las campañas de 2013 .....           | 46 |
| Figura 23.- Planificación campañas GPS 2013 (AVILÉS, y otros, 2013) .....         | 47 |
| Figura 24.- Ejemplo de línea procesada con Leica Geo Office .....                 | 51 |
| Figura 25.- Campos de velocidades absolutos y relativos Topo-Iberia (UJA) .....   | 60 |
| Figura 26.- Planificación de las campañas GPS de 2014 y 2015 .....                | 61 |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 27.- Series temporales y velocidades de la estación MATE ..... | 63 |
| Figura 28.- Series temporales y velocidades de la estación SFER ..... | 63 |
| Figura 29.- Series temporales y velocidades de la estación ZIMM.....  | 64 |
| Figura 30.- Desplazamientos verticales de la línea A.....             | 66 |
| Figura 31.- Desplazamientos verticales de la línea B.....             | 66 |
| Figura 32.- Desplazamientos verticales de la línea C .....            | 67 |
| Figura 33.- Desplazamientos verticales de la línea CI .....           | 67 |
| Figura 34.- Velocidades residuales en los puntos A y B .....          | 70 |
| Figura 35.- Velocidades residuales en los puntos C .....              | 71 |
| Figura 36.- Velocidades residuales en los puntos CI .....             | 72 |
| Figura 37.- Velocidades residuales de todos los puntos .....          | 73 |
| Figura 38.- Series temporales del punto C00.....                      | 74 |
| Figura 39.- Series temporales del punto C07 .....                     | 75 |
| Figura 40.- Series temporales del vértice V100 .....                  | 75 |

## **Listado de Tablas**

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1.- Productos del IGS relativos al sistema GPS (IGS, 2016) .....       | 29 |
| Tabla 2.- Campaña 2014 – Desniveles y tolerancia por tramos Línea A .....    | 52 |
| Tabla 3.- Campaña 2014 – Desniveles y tolerancia por tramos Línea B .....    | 52 |
| Tabla 4.- Campaña 2014 – Desniveles y tolerancia por tramos Línea C .....    | 53 |
| Tabla 5.- Campaña 2014 – Desniveles y tolerancia por tramos Línea CI .....   | 54 |
| Tabla 6.- Campaña 2015 – Desniveles y tolerancia por tramos Línea A .....    | 55 |
| Tabla 7.- Campaña 2015 – Desniveles y tolerancia por tramos Línea B .....    | 55 |
| Tabla 8.- Campaña 2015 – Desniveles y tolerancia por tramos Línea C .....    | 56 |
| Tabla 9.- Campaña 2015 – Desniveles y tolerancia por tramos Línea CI .....   | 57 |
| Tabla 10.- Cierres y tolerancias de las nivelaciones 2014 y 2015 .....       | 65 |
| Tabla 11.- Velocidades residuales de los puntos de control de la presa ..... | 68 |



## **Agradecimientos**

Me gustaría dedicar este trabajo a Julia por todo el tiempo que hemos dejado de pasar juntos para que acabara este ciclo. Al igual que a Chiqui por la paciencia, comprensión y facilidades que me ha regalado en estos meses. Gracias a las dos, sin vosotras no estaría aquí.

Vorrei ringraziare ai miei tutori M. Clara de Lacy y Antonio J. Gil per l'opportunità di lavorare ancora con loro 15 anni dopo. È stata importantissima la vostra guida e il vostro sostegno per finire la tesi. Grazie mille.

También quisiera agradecer el apoyo y colaboración de tantos compañeros que me han empujado a terminar. Especialmente a Antonio, Óscar y Manolo, el resultado es también vuestro.

Por último, no puedo olvidar mi agradecimiento a mi compañero Carlos Colomo por su insistencia y el espacio y tiempo prestados para concluir esta etapa y abrir nuevas.



## **Resumen**

El control de deformaciones de la corteza terrestre mediante técnicas geodésicas de precisión es algo bastante extendido, conocido y muy estudiado. Sin embargo, la utilización de estas técnicas al control de deformaciones en Ingeniería Civil no es habitual.

Actualmente las redes de estaciones GNSS permanentes se han implantado de forma sólida y duradera con el apoyo principalmente de las instituciones públicas en todo el territorio nacional. Se trata de infraestructuras costosas en un primer momento que hay que dotar de sentido mediante el máximo aprovechamiento de sus bondades.

El presente trabajo se desarrolla en la presa del Arenoso, de gravedad y materiales sueltos, en la que se han realizado una serie de campañas de control de deformaciones previamente. Dichas campañas han sacado a la luz una serie de problemas de estabilidad de los puntos de referencia que no han podido ser solventados desde dentro del sistema implementado.

Para tratar de solucionar dichas dificultades y verificar la compatibilidad de las técnicas geodésicas con la auscultación de estructuras, se realiza un nuevo procesamiento de las campañas previas junto con una serie de estaciones permanentes.



## 1.- Introducción

El presente documento corresponde al Trabajo Fin de Grado realizado por Juan Pedro Cano Córdoba para la obtención del título de Graduado en Ingeniería Geomática y Topográfica por la Universidad de Jaén. El mismo ha sido dirigido por los profesores Dña. M. Clara de Lacy Pérez de los Cobos y D. Antonio J. Gil Cruz, pertenecientes al Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría de la Escuela Politécnica Superior de Jaén

La principal motivación de este trabajo es la aplicación de técnicas geodésicas de alta precisión para el control de deformaciones en la corteza a la Ingeniería Civil.

La existencia de redes de estaciones GNSS (Global Navigation Satellite System) que ofrecen a los usuarios posicionamiento, observaciones u otros productos derivados, suponen una oportunidad para encontrar nuevos espacios de negocio y/o investigación.

Como se pretende demostrar en este trabajo, un uso distinto de las redes en cuanto al objeto de aplicación, que no a sus métodos, ofrece un aprovechamiento mejorado de estas infraestructuras en ocasiones escasamente utilizadas por desconocimiento de su potencial.

La posibilidad de aplicar este tipo de técnicas a una presa finalizada hace menos de 10 años de tipo gravedad y materiales sueltos es realmente interesante, por el simple hecho de tener la seguridad de que se producen movimientos. Este tipo de presas tienen varias fases de asentamiento que se prolongan considerablemente en el tiempo y por otra parte, la deformaciones en la presa se producen también en función del nivel de agua de embalse, cambios climatológicos, etc.

La presa de estudio es la presa del Arenoso en el término municipal de Montoro, provincia de Córdoba (España).

A todo lo citado anteriormente se une la necesidad de verificar si es posible resolver algunos problemas detectados en campañas anteriores. El apoyo de las redes GNSS será el sustento que necesita la red utilizada hasta el momento.

Los principales objetivos planteados para este trabajo son:

- Aplicar técnicas geodésicas de alta precisión (GPS y nivelación) al control de deformaciones en la Ingeniería Civil.
- Desarrollar las pertinentes campañas de observación GPS y de nivelación de alta precisión.
- Integrar los resultados con los obtenidos en campañas precedentes.

Para concluir la introducción se realizará un breve repaso al contenido desarrollado en el resto de capítulos de este documento.

Capítulo 2: Contexto GPS – se realiza una aproximación a los marcos de referencia recorriendo una parte de la estructura del International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS). A continuación, se realiza una sucinta descripción de las estaciones GNSS permanente y se pasa a la principal y más importante red GNSS global, el International GNSS Service (IGS). Seguidamente se pasa a la red utilizada en este trabajo como apoyo de las observaciones realizadas en la presa.

Capítulo 3: Presa del Arenoso – se lleva a cabo un recorrido por la presa objeto de estudio, comenzando por su descripción como estructura y continuando por el relato y descripción de los trabajos de auscultación previamente ejecutados en ella.

Capítulo 4: Desarrollo del trabajo – detallada explicación de la planificación y ejecución de las campañas, además de las estrategias seguidas para el procesado de la información.

Capítulo 5: Análisis de resultados y Conclusiones – presentación de los resultados literal y gráficamente para finalizar con las conclusiones alcanzadas tras el proceso completo.

## **2.- Contexto GPS**

En este capítulo se realiza una introducción a los sistemas y marcos de referencia, con el foco puesto en el IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service). Se utiliza esta institución, su organización y su evolución desde que se creara, para explicar los elementos fundamentales en la realización de este trabajo.

Se continúa con la presentación de las redes de estaciones permanentes GPS, pieza clave para el control de deformaciones geodésicas en la actualidad. En el capítulo se incide en el IGS (International GNSS Service) y en la red Topo-Iberia.

De un lado, IGS es la principal red mundial de estaciones GNSS de referencia por excelencia. Su importancia trasciende a la tecnología GNSS por su implicación cada vez más importante en la realización de nuevos marcos de referencia cada vez más precisos. Sus productos y recomendaciones se han convertido en estándares de facto para la elección de la ubicación, monumentación, correcciones de antena, órbitas de los satélites, etc.

De otro, Topo-Iberia es un ejemplo perfecto de red nacional de estaciones GPS permanentes de la que se puede extraer mucho más partido y utilidades. Se trata de una red participada por los tutores de este documento, la Universidad de Jaén es uno de sus centros de análisis, y, por tanto, de contrastadas posibilidades para cumplir con el objetivo previsto para este trabajo.

### **2.1.- Sistemas y Marcos de Referencia**

Según el grupo de trabajo de la División 1 de la International Astronomical Union (IAU) en su Nomenclature for Fundamental Astronomy (NFA) (IAU, 2007), se define un sistema de referencia como la concepción teórica de un sistema de coordenadas, donde se incluye el tiempo y las reglas necesarias para especificar las bases a usar en la definición de la posición y el movimiento de objetos en el espacio y el tiempo. La definición une la referencia espacial y la temporal. Se debe a que el conjunto de reglas está sujeto a procesos geofísicos que cambian con el

tiempo y, además, a que las técnicas de medición observan tiempos para la determinación de distancias.

Un sistema de referencia terrestre (TRS) es aquel que rota solidario con el movimiento diurno de la Tierra en el espacio (IERS, 2010). El presente documento se centrará en los sistemas geocéntricos (GTRS), definidos como un sistema de coordenadas espacio-temporal geocéntrico dentro del marco de la Relatividad General que rota con la Tierra y que se encuentra relacionado con un sistema de referencia celeste geocéntrico (GCRS) en el que se apoya para obtener los parámetros de orientación terrestres. Aunque el foco del documento está en los GTRS, también se realizará revisión de los GCRS en este capítulo con la intención de clarificar la importante relación entre ambos.

El otro elemento importante a tratar en este capítulo, fundamental por la temática de este trabajo, es un marco de referencia. Continuando con las definiciones de la NFA, se trata de la realización práctica de un sistema de referencia, normalmente a modo de catálogo de posiciones y movimientos de un cierto número de puntos fundamentales. Se efectúa con la realización de su origen, orientación de los ejes y escala, así como su evolución en el tiempo. Es decir, una materialización del sistema de referencia a partir de observaciones físicas y geométricas a los puntos fundamentales.

Este tipo de sistemas está sujeto a los fenómenos físicos que se producen en la Tierra, por lo que deben ser considerados para la correcta definición del sistema de referencia. Esto muestra la relevancia que tiene el tiempo en la definición inicial del capítulo puesto que se describe una realidad física variable en el tiempo. A continuación, se enumerará los fenómenos físicos a considerar:

- Movimiento de traslación alrededor del Sol.
- Movimiento de rotación, incluyendo la precesión y la nutación.
- Movimiento del polo o Chandler Wobble.
- Fenómenos periódicos, como son las deformaciones producidas por las mareas terrestres y oceánicas o las cargas oceánicas.
- Fenómenos no periódicos debidos a la dinámica terrestre.

### **2.1.1.- International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS)**

En 1987, el actual International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) fue establecido por la IAU y la International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) con objeto de proporcionar a la comunidad científica (IERS, 2013):

- El sistema de referencia celeste internacional (ICRS) y sus realizaciones (ICRF).

- El sistema de referencia terrestre internacional (ITRS) y sus realizaciones (ITRF).
- Los parámetros de orientación de la Tierra necesarios para el estudio de las variaciones de la orientación terrestre y la transformación entre el ICRS y el ITRS.
- Información geofísica para la interpretación de las variaciones espacio-temporales en el ICRS, el ITRF o los parámetros de orientación terrestres, y los modelos de dichas variaciones.
- Reglas, constantes y modelos recomendados para su uso internacionalmente.

Con la finalidad de cumplir los objetivos comprometidos en su fundación, el IERS recopila, almacena y distribuye una serie de productos necesarios para un amplio espectro de aplicaciones, investigaciones y experimentaciones científicas. A través de una serie de Centros de Producción se elaboran y procesan dichos productos para su uso por parte de la comunidad científica. A continuación, se pasará a describir brevemente la misión que tiene cada uno de estos centros y sus productos.

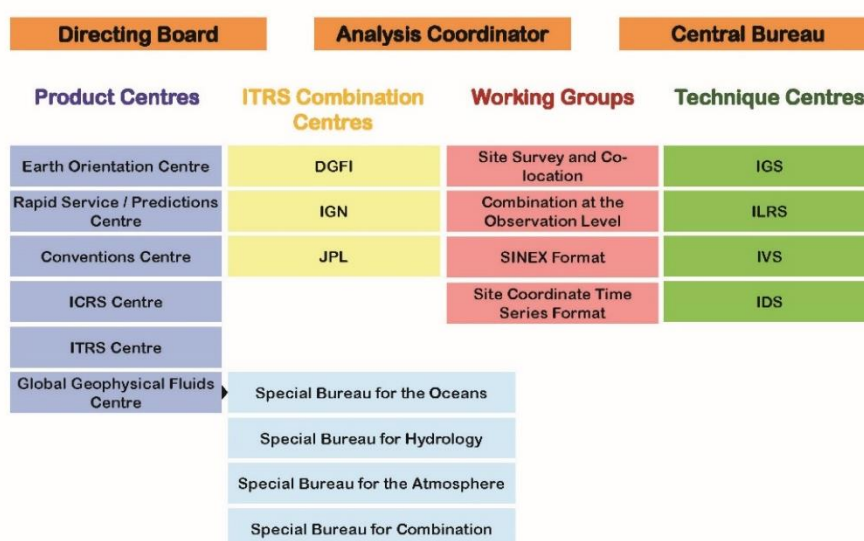


Figura 1.- Estructura del IERS (IERS, 2013)

#### 2.1.1.1.- Earth Orientation Centre

El Centro de Orientación Terrestre (Earth Orientation Centre) es el centro de producción del IERS responsable del seguimiento y elaboración de los Parámetros de Orientación Terrestre (EOP) a largo plazo. Se encarga de proveer la solución final de los EOP mensualmente entre otros cometidos. (IERS\_EOC, 2016)

Los EOP relacionan los sistemas de referencia terrestre y celeste geocéntricos (GTRS y GCRS). Más adelante se concretará el nombre y definición de los utilizados por la comunidad internacional y en este trabajo. La orientación de la Tierra se determina a partir de la rotación de la corteza terrestre, al que está fijo el GTRS, respecto del GCRS. Éste último se obtiene mediante la observación astronómica a cuásares, estrellas y objetos del Sistema Solar y no está sujeto a la rotación terrestre. Por tanto, los EOP describen las irregularidades de la rotación terrestre en función del tiempo.

La rotación se descompone en tres partes:

- El efecto que tienen la precesión y la nutación sobre el eje terrestre. Para ello se define un eje ficticio denominado polo celeste intermedio (CIP) a partir de un modelo de precesión-nutación y unas correcciones al mismo (desviaciones del polo celeste determinadas con observaciones VLBI).
- La rotación diurna alrededor del CIP. Se puede descomponer en el ángulo que varía de manera uniforme y en las correcciones que muestran sus variaciones de la velocidad angular.
- El movimiento del CIP con respecto a la corteza terrestre, define las coordenadas del eje instantáneo de rotación. Estas variaciones se deben a la redistribución de las masas atmosférica y oceánica.

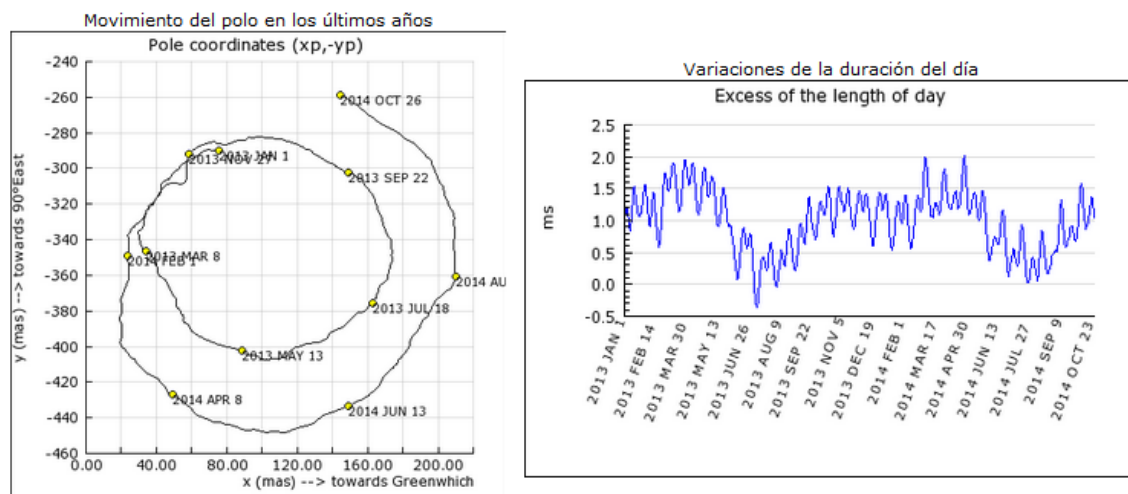


Figura 2.- Ejemplo gráfico de productos del Centro de Orientación Terrestre

El Centro de Orientación Terrestre se ocupa de las siguientes líneas de trabajo:

- Obtener series temporales individuales de los EOP a partir de una determinada técnica de observaciones astrogeodésicas (LLR, SLR, GPS, VLBI y DORIS), es decir, movimiento del polo, tiempo universal y desviaciones del polo celeste.
- Almacenar los EOP y facilitarlos vía FTP/WEB (Bulletin B).

- Analizar los EOP y determinar la coherencia con los sistemas de referencia terrestre y celeste internacionales.
- Producir una serie combinada estándar de los EOP en la solución C04, utilizando las diversas observaciones astrogeodésicas conjuntamente.
- Calcular y difundir DUT1 y el anuncio de la introducción del segundo intercalar (Bulletin C y Bulletin D).

#### **2.1.1.2.- Rapid Service / Prediction Centre (RS/PC)**

El RS/PC está ubicado en el U.S. Naval Observatory (USNO) y es el centro de producción del IERS responsable de proporcionar los EOP de elaboración rápida (USNO, 2016). Se trata de distribuir unos EOP de alta calidad para aquellos usuarios que no pueden esperar a la publicación de las series finales del Centro de Orientación Terrestre (mensuales y anuales).

En el RS/PC se elabora productos con los EOP calculados para un pasado muy próximo y otros predichos y los distribuye como solución diaria y semanal. Por tanto, los destinatarios de estos productos serán aquellos que necesiten esta información para un tiempo muy reciente (requerirán un servicio rápido) y aquellos que operen en tiempo real (requerirán predicciones).

Aun no siendo el único producto del RS/PC, el más importante es el Bulletin A del IERS. Se actualiza mensualmente y en él se publican los últimos valores obtenidos para los EOP (procedentes del Bulletin B) y unos valores predichos para el siguiente año. Para la elaboración de las predicciones, se incluyen en los cálculos unas predicciones meteorológicas de la variación del momento angular de la atmósfera (AAM), por lo que la predicción tiene mayor precisión cuanto menor sea el plazo entre su publicación y su uso.

#### **2.1.1.3.- Conventions Centre**

El Centro de Convenciones es el responsable del mantenimiento los modelos, constantes y normas convencionales del IERS (BIPM, y otros, 2015). Lo componen dos equipos, uno en el Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) y otro en el U.S. Naval Observatory (USNO).

Por tanto, se encarga de describir los sistemas de referencia realizados por el IERS y los modelos y procedimientos usados para este fin. Los resultados adoptados se publican en forma de libro con periodicidad de algunos años, el último es de 2010 y se publicó en la IERS Technical Note 36 (IERS, 2010).

En el tiempo que transcurre entre la publicación de la última versión final y la siguiente es de participación y análisis. Tras la evaluación de los comentarios y propuestas recibidos, se pone a disposición de la comunidad científica como

versión de trabajo las diferentes modificaciones de los capítulos de la Convención en vigor. En dichos documentos se señala convenientemente los cambios en el margen, incluidas las fechas en que se efectuaron.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| by the IERS to describe the most currently observed FCN motion of the CIP. Successive versions are identified by a date included in their name, the current realization (fcnnut130701) has been established on July 1 <sup>st</sup> , 2013. Since 2011, the realization is fitted to the IERS 08 C04 data set which replaced the IERS 05 C04 data set on February 1 <sup>st</sup> , 2011. Some significant changes exist with respect to adjustments made until 2010 (Lambert, 2011). | 2013/12/20 |
| The model describes the quantities to be added to the X, Y coordinates of the CIP in the GCRS to account for the FCN effect. It provides this information in the form of a time-varying sinusoidal representation that assumes a constant period of $P = -430.21$ days. The equations for the model are                                                                                                                                                                               | 2012/08/10 |
| $\begin{aligned} X_{FCN} &= X_S \sin(\sigma t) + X_C \cos(\sigma t), \\ Y_{FCN} &= Y_S \sin(\sigma t) + Y_C \cos(\sigma t), \end{aligned} \quad (5.28)$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 2012/08/10 |
| where $\sigma$ is the angular frequency of the FCN ( $= 2\pi/P$ rad/d) and $t$ is given in days since J2000.0.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |            |

Figura 3.- Ejemplo de modificaciones al Capítulo 5 de (IERS, 2010)

#### 2.1.1.4.- Global Geophysical Fluids Centre (GGFC)

Desde 1998 opera el GGFC en un esfuerzo por ampliar los servicios del IERS a la comunidad científica (GGFC, 2015). Su estructura actual está compuesta por tres agencias especiales operativas, cada una responsable de la investigación y servicio de datos para las actividades relacionadas al movimiento de masas en los sistemas atmosférico, oceánico e hidrológico (SBA, SBO y SBH respectivamente). Una cuarta agencia se ocupa de los cambios de masa en sistemas combinados entre los anteriormente citados.

- SBA: proporciona datos atmosféricos relevantes para el estudio de las variaciones en la rotación terrestre. El principal dato es el momento angular atmosférico. Debido a la general conservación del momento angular del sistema Tierra-Atmósfera, las variaciones del momento angular atmosférico serán compensadas por el momento angular terrestre en sentido contrario.
- SBO: es el responsable de recoger, calcular, analizar, almacenar y distribuir los datos relativos a los cambios no relacionados a las mareas en los procesos oceánicos por su efecto sobre la rotación, deformación, campo gravitatorio y geocentro terrestre.
- SBH: se encarga de la coordinación de las actividades investigadoras acerca de las aguas continentales. Se ocupa de recoger y distribuir conjuntos de datos y modelos numéricos resultantes relativos a los cambios en la distribución del agua continental. Principalmente se centra en los modelos globales de manera que permita comparaciones útiles con variaciones geodésicas, tales como la rotación terrestre o el campo gravitatorio.
- Productos combinados: se estableció para alojar nuevos conjuntos de datos que modelan el movimiento de masas de un sistema combinado, como por ejemplo océanos-atmósfera.

### 2.1.1.5.- ICRS Centre

En 1997, la International Astronomical Union (IAU) adoptó el Sistema de Referencia Celeste Internacional (ICRS, International Celestial Reference System) como base para todas las mediciones astronómicas mediante la definición de las direcciones de referencia de un sistema de coordenadas celeste pseudoinercial, fijo respecto de los objetos más lejanos del universo (IAU, 1997). Se trataba de reemplazar el anterior sistema basado en el FK5 (Fifth Fundamental Catalogue).

En 2001 por encargo de la IAU, se crea en el IERS el ICRS Centre como responsable del seguimiento del ICRS, así como del mantenimiento de su realización actual (ICRF, International Celestial Reference Frame). También es responsable de mantener y proporcionar las conexiones entre este marco y otros marcos de referencia celestes. Estas actividades las lleva a cabo conjuntamente con el International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS) (ICRS, 2009).

A continuación, se realizará un repaso a la definición del ICRS partiendo de los requisitos explicitados en la resolución nº A4 de la 21ª Asamblea General de la IAU en 1991 (Recommendations from the Working Group on Reference Systems) (IAU, 1991) donde se establecen sus bases hasta la actualidad:

- El sistema de coordenadas espacio temporales debe enmarcarse en la teoría general de la relatividad y definir el origen del sistema en el baricentro de un conjunto de masas. De esta forma se reconoce la imposibilidad de describir correctamente el espacio-tiempo mediante un único sistema de coordenadas puesto que no podría representar correctamente todos los fenómenos físicos relevantes. Para salvar este problema se definen dos sistemas, uno centrado en el baricentro del sistema solar y otro en el centro de masas de la Tierra.
- Respecto a un conjunto de objetos extragalácticos, los sistemas no pueden estar afectados por la rotación global. Además, la coordenada temporal se regirá por la escala temporal de relojes atómicos que operan en la Tierra.
- El sistema de referencia baricéntrico se debe basar en la observación de objetos extragalácticos. Para ello se propone comparar distintos marcos realizados por diferentes organismos e instituciones con el fin de determinar diferencias sistemáticas y sus precisiones. También se propone realizar una selección de objetos primarios observados sistemáticamente mediante VLBI y otras técnicas astronómicas para la definición de este sistema baricéntrico. La IAU se emplaza a la siguiente asamblea (1994) para emitir la lista de objetos.
- El plano principal del sistema debe ser lo más próximo posible al ecuador medio en la época de referencia J2000.0 y su origen tan próximo como sea posible al equinoccio dinámico en dicha época, es

decir, la intersección del ecuador medio con la eclíptica. Se pretende que no exista discontinuidad entre el nuevo sistema y el vigente definido por el FK5, para cual se adopta la posición que tienen en FK5 los objetos extragalácticos para época J2000.0.

La IAU, en la resolución nº B5 de su 22ª Asamblea General (IAU, 1994), realiza la lista definitiva de fuentes de radio extragalácticas que a partir de su posición observada con VLBI conformarán el nuevo marco de referencia celeste. Junto a estos objetos de definición, la lista incluye otras fuentes como candidatas a pertenecer al marco de referencia en futuras realizaciones, bien como adición bien reemplazando alguna incluida en ese momento.

En su 23ª Asamblea General (IAU, 1997), la IAU adopta, con la resolución nº B2, el ICRS definido por el IERS. Su entrada en vigor se produce el 1 de enero de 1998. También encarga al IERS el mantenimiento del ICRF establecido en la asamblea de 1994, así como las relaciones con marcos de referencia relativos a otras longitudes de onda. Por ejemplo, su relación con el catálogo Hipparcos. De este modo, el ICRS es accesible directamente mediante observaciones VLBI a fuentes de radio extragalácticas compactas recogidas en el ICRF; o bien indirectamente a través del catálogo estelar Hipparcos, por ejemplo (ARIAS, y otros, 1995). Se adopta el catálogo Hipparcos como marco de referencia celeste para longitudes de onda dentro del visible. La IAU se emplaza (resolución nº B5) a su siguiente asamblea para clarificar una serie de consideraciones acerca del ICRS, se trata de determinar claramente los efectos en el sistema de ejes fijado a partir de observaciones extragalácticas teniendo presente que éstas se realizan desde la Tierra (afectadas por los movimientos de precesión y la nutación terrestres).

La resolución nº B1.3 de la 24ª Asamblea General de la IAU (IAU, 2000) renombra como Sistema de Referencia Celeste Baricéntrico (BCRS, Barycentric Celestial Reference System) a aquel centrado en el baricentro del sistema solar y Sistema de Referencia Celeste Geocéntrico (GCRS, Geocentric Celestial Reference System) a aquel cuyo origen está en el centro de masas de la Tierra. En ella también determina la transformación entre los dos sistemas de referencia celestes planteados en la asamblea de 1991. Puesto que se trabaja en un marco relativista, es necesario realizar una transformación también en la coordenada temporal al pasar del BCRS a GCRS o viceversa. Dicha transformación se expone en la resolución B1.5.

A consecuencia de las mejoras en la precisión de las observaciones, se requiere una definición más exacta de los sistemas de referencia que la existente. Por ello, la resolución B1.7 introduce el Polo Celeste Intermedio (CIP, Celestial Intermediate Pole) con el que se tiene en cuenta las variaciones diurnas y de mayor frecuencia en la orientación de la Tierra. El desfase del CIP respecto al polo del GCRS en la época J2000.0 se obtiene a partir del modelo de precesión-

nutación IAU 2000A (definido en la resolución B1.6, con entrada en vigor a partir del 1 de enero de 2003). En esta cuestión, el IERS es el responsable de proporcionar todas estas correcciones, como ya se indicó anteriormente, a través del Earth Orientation Centre, como ya se señaló anteriormente.

La 26ª Asamblea General de la IAU se celebró en 2006 (IAU, 2006). En su resolución 2 se completó la definición del BCRS y GCRS, otorgando al primero una orientación coincidente con los ejes definidos para el ICRS en la resolución nº A4 de la 21ª Asamblea General (IAU, 1997) y al segundo una orientación derivada del primero.

A modo de resumen, el ICRS queda definido de la siguiente forma:

- Su origen está en el baricentro del sistema solar a partir de un modelo de observaciones VLBI en el marco de la relatividad general.
- Eje z: El polo se obtiene mediante el análisis de observaciones VLBI y tiene una diferencia inferior a los 20 mas (milisegundos de arco) respecto al polo obtenido a partir de los modelos convencionales de la IAU para la precesión y nutación para la época J2000.0. El polo es consistente con el correspondiente al sistema FK5 dentro de la incertidumbre de este último. De este modo queda definido el plano principal del sistema, el ecuador celeste de referencia.
- Eje x: pasa por el equinoccio de primavera de referencia implícitamente definido a partir de la ascensión recta media en la época J2000.0 de 23 fuentes de radio observadas mediante VLBI en un grupo de catálogos. Estos catálogos se compilaron fijando la ascensión recta del cuásar 3C273B para su valor en FK5. El eje obtenido es consistente con el correspondiente al sistema FK5 con una diferencia inferior a los 23 mas.
- El eje y: se define formando una terna dextrógira con los dos anteriores.

El ICRS se materializa mediante el ICRF, una realización del ICRF consiste en un conjunto de coordenadas precisas de fuentes de radio compactas extragalácticas (IERS, 2010). Estas fuentes se han observado durante un periodo largo de tiempo para asegurar su estabilidad, puesto que son las responsables del mantenimiento de los ejes del ICRS. Sus posiciones son independientes del ecuador, equinoccio, eclíptica y tiempo, pero deben ser consistentes con las realizaciones estelares y dinámicas previas dentro de la incertidumbre de estas últimas. Como ya se indicó anteriormente, la primera selección de fuentes se aprobó en 1994 y, en 1995, se llevó a cabo la construcción del denominado ICRF1 a partir de la posición VLBI de 212 fuentes. A estas fuentes se les llama “de definición” (defining) y se acompañaron con la posición de 294 fuentes más catalogadas como “candidatas” (candidate) y 102 más como “otra” (other). Las fuentes candidatas son posibles integrantes del grupo de definición en el futuro,

aquí se encuadra aquellas que no se ha confirmado aún su estabilidad por diversas razones (insuficiencia de observaciones, etc.) pero se espera que lo sean.

La segunda y actual realización, llamada ICRF2, se estableció en 2009 a partir de una nueva selección de 295 fuentes en la categoría “defining”. ICRF2 contiene la posición precisa de otras 3119 fuentes entre “candidate” y “other”, más de 5 veces las recogidas en la anterior realización. El ICRF2 es más preciso (más observaciones, mejoras en las técnicas, etc.) y está definido por un conjunto de fuentes distribuidas con mayor uniformidad.

Durante la Asamblea General de la IAU celebrada en Beijing (China) en 2012, se planteó por parte del ICRS Centre la creación de un grupo de trabajo para iniciar las labores pertinentes para la confección del ICRF3 (ICRS, 2014). Se pretende que el trabajo esté completado para el año 2018.

La IAU decidió en 1997 reemplazar el marco de referencia óptico FK5 por el catálogo Hipparcos, más preciso y con mayor número de estrellas incluidas. El alineamiento de Hipparcos con ICRF se obtuvo mediante diversos métodos a partir de observaciones VLBI a una docena de fuentes de radio dotadas con los mayores pesos en los cálculos. Su principal problema es que sólo cuenta con observaciones a lo largo de 4 años.

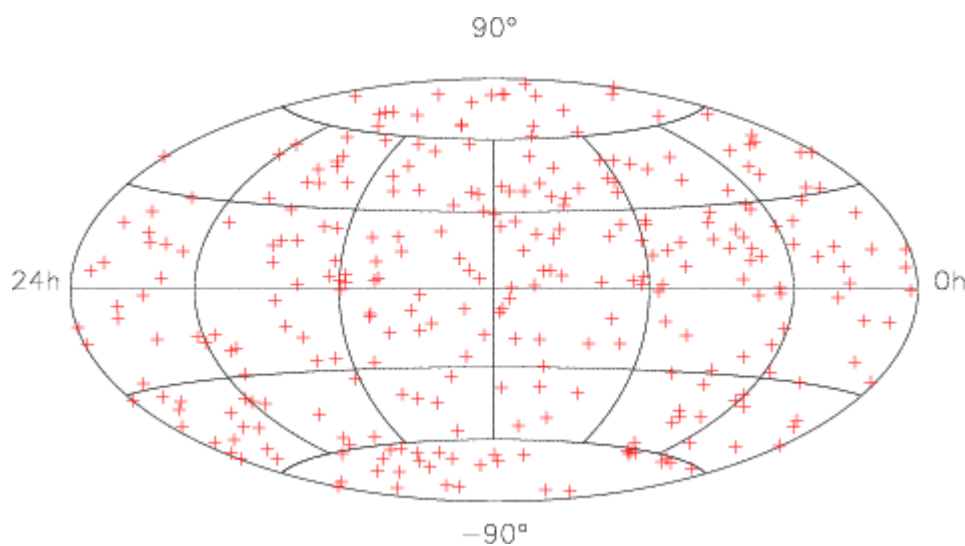


Figura 4.- Distribución de fuentes “defining” en ICRF2 (ICRS, 2009)

Para concluir con este apartado, se enumerarán las responsabilidades del ICRS Centre y sus productos más relevantes (ICRS, 2009):

- Seguimiento del ICRS.
- Mantenimiento y distribución de las distintas realizaciones del ICRF, promoviendo y coordinando las observaciones, monitorizando la estructura de las fuentes usadas y actualizando el catálogo.

- Mantenimiento de las relaciones entre ICRS y los marcos de referencia ópticos, principalmente con el catálogo Hipparcos.
- Seguimiento de la evolución a lo largo del tiempo de la posición instantánea y movimiento del equinoccio y eclíptica.
- Almacenamiento y distribución de las observaciones precisas a púlsares.

#### 2.1.1.6.- ITRS Centre

El International Terrestrial Reference System Centre (ITRS Centre) surgió como consecuencia de la reestructuración realizada por la IAG al crear el IERS. Se trata de un centro que continúa las labores desarrolladas por el Bureau International de l'Heure (BIH) relativas al establecimiento y mantenimiento del sistema de referencia terrestre y su marco (BOUCHER, y otros, 1990). Por tanto, sus principales productos son el International Terrestrial Reference System (ITRS) y el International Terrestrial Reference Frame (ITRF).

El ITRS es un sistema de coordenadas espacio-temporal geocéntrico dentro del marco de la relatividad general, con rotación solidaria al movimiento diurno de la Tierra y relacionado con el GCRS (ver apartado anterior) mediante una rotación espacial descrita por los parámetros de orientación terrestres. Su definición cumple con las siguientes condiciones (IERS, 2013):

- El origen está en el centro de masas de la Tierra incluyendo los océanos y la atmósfera.
- Las unidades, para la longitud el metro (SI) y la coordenada de tiempo es consistente con el TGC (Geocentric Time Coordinate) de acuerdo con la resolución nº A4 de (IAU, 1991).
- La orientación, inicialmente coincidente con la orientación del BIH para la época 1984.0.
- La evolución temporal de la orientación se asegura usando una condición de red sin rotación atendiendo a los movimientos tectónicos horizontales de la tierra entera.

La realización del ITRS será el correspondiente ITRF, como ya se definió al inicio del capítulo. Se obtiene mediante la combinación de algunos conjuntos de estaciones de coordenadas (SSC) proporcionados por los centros de análisis participantes (ALTAMIMI, y otros, 1993). Cada SSC está compuesto por diversas técnicas geoespaciales, las cuales han cambiado a lo largo del tiempo. Por ejemplo, en las primeras realizaciones se utilizaba las observaciones Doppler, pero con el tiempo desaparecieron, situación inversa a la del GPS que se introdujo cuando alcanzó un desarrollo apropiado para estos fines. En estos momentos, ya no se puede hablar de GPS exclusivamente, es necesario hacer referencia a GNSS.

### Realizaciones BTSyy

Con anterioridad a la creación del IERS, el BIH inició en 1984 la publicación anual de un marco de referencia terrestre basado en la combinación de los datos geodésicos espaciales facilitados por varios centros de análisis para la determinación de los ERP. Se denominaba BIH Terrestrial System (BTS) y se realizó hasta el BTS87 con las siguientes características (BOUCHER, y otros, 1990) (BOUCHER, y otros, 1989):

- Inicialmente se utilizaban observaciones de las técnicas VLBI, SLR, LLR y Doppler. Para BTS87 sólo se utilizaron las tres primeras.
- De BTS84 a BTS86 se publicaba únicamente las coordenadas de los puntos de referencia, en BTS87 se incluyó también puntos de medición.
- Se consideraban las deformaciones permanentes de marea sobre la Tierra sólida de forma global y no los términos periódicos. Se usaban series de parámetros de rotación terrestre (ERP).
- Para las coordenadas geográficas se comienza a usar el elipsoide GRS80.
- En BTS84 y 85, la posición estaba referida a la época media de las observaciones de la estación. Para BTS86 y 87, todas se refirieron a la época 1984.0.
- Los conjuntos de coordenadas de las estaciones estaban referidos a la época común usada para el ajuste, la evolución temporal asignada al sistema no tenía influencia en el ajuste, sino sólo sobre el valor de posiciones ajustadas en épocas diferentes a la época de referencia. El campo de velocidad venía dado por el modelo AM0-2 que divide la superficie de la Tierra en 11 placas tectónicas para calcular los desplazamientos y velocidades de cada una de ellas, se aplica según la siguiente ecuación:

$$X(t) = X_0 + \dot{x} * (t - t_0) \quad [1]$$

Donde  $X(t)$  son las coordenadas para la época  $t$ ;  $X_0$  son las coordenadas ajustadas para la época de referencia  $t_0$  y  $\dot{x}$  es el vector de velocidades calculado con el modelo AM0-2.

- En el ajuste se calculan los parámetros de rotación terrestres (cada 0.05 años) y también se obtiene los 7 parámetros de transformación para cada conjunto de coordenadas de las estacías (SSC).
- En BTS87, el datum se define con el origen a partir de la media de 5 SSC (3 LLR y 2 SLR) con un constreñimiento cero en los parámetros de traslación; la escala mediante 2 SSC (SLR) con constreñimiento cero en los correspondientes parámetros de escala; la orientación alineada con la orientación BIH poniendo un constreñimiento de

alineación sobre los parámetros de rotación terrestres, usando los valores BIH de 1986; por último, la evolución temporal adoptada se basa en los ya comentados desplazamientos del modelo AM0-2, siguiendo una condición de red sin rotación.

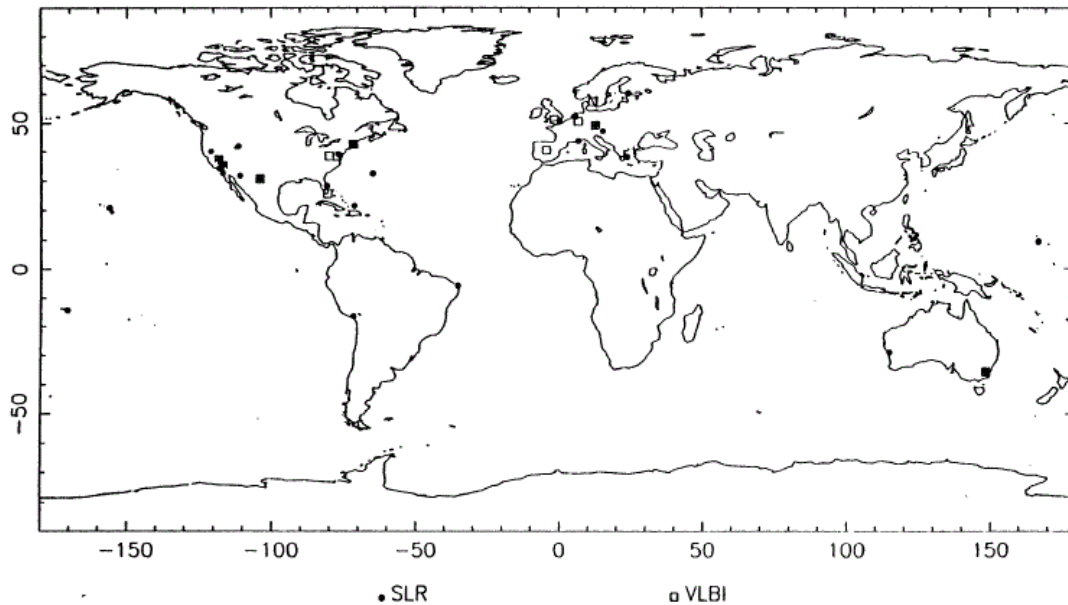


Figura 5.- Mapa de ubicaciones de BTS84 (BOUCHER, y otros, 1990)

### ITRF0

El primer paso tras la creación del IERS fue el desarrollo del ITRF0, una nueva combinación de BTS87 siguiendo los estándares marcados por el propio IERS para un marco de referencia terrestre inicial. Presentó las siguientes diferencias respecto a sus predecesores BTS (BOUCHER, y otros, 1989):

- Las técnicas utilizadas fueron únicamente VLBI, LLR y SLR.
- Se aplican las deformaciones permanentes de marea sobre la Tierra sólida de manera independiente.
- La época de referencia es 1988.0.
- Los parámetros de transformación se ajustan de manera que el nuevo marco esté en el sistema BTS87. Para ello, se mantiene a cero los 7 parámetros de un SSC adicional con valores BTS87. Se evita el sobreconstreñimiento mediante la fijación a priori de alguna escala o traslación.
- No se usan los parámetros de rotación terrestre (ERP).
- Clasifica las estaciones, considera estaciones prioritarias en función de los siguientes criterios: preferiblemente el instrumental debe ser permanente (SLR o VLBI), usar la tecnología más avanzada y contar con mediciones regulares con objeto de permitir la estimación de posiciones para épocas regulares con precisión. Tras el análisis de

todas las estaciones, se determina clasificar 34 como estaciones primarias.

- Los datos de salida del ajuste incluyen los parámetros de transformación con sus desviaciones típicas a posteriori y las desviaciones típicas y residuos de los datos de entrada.

### ***ITRF88***

El siguiente marco fue ITRF88 y presenta unas nuevas diferencias con respecto a los anteriores: los ERP no se vuelven a usar en adelante, las medidas locales se introducen con sus varianzas y, por consiguiente, todos los puntos son ajustados, dejando de ser necesarios los puntos de referencia (BOUCHER, y otros, 1990).

### ***ITRF89, ITRF90, ITRF91, ITRF92***

Las realizaciones ITRF89, ITRF90, ITRF91 e ITRF92 mantienen como época de referencia 1988.0 y se calculan del mismo modo que ITRF88 salvo por el hecho de que en ITRF91 se incorpora el GPS a las técnicas de medición utilizadas. En ITRF91 se calcula los campos de velocidad a partir de la combinación de los campos estimados por centros de análisis de SLR y VLBI (ALTAMIMI, y otros, 1993). Además, se deja de utilizar el modelo AM0-2 para formular los desplazamientos, se adopta NUVEL-1 NNR y se usa en el ajuste global de los campos de velocidades de ITRF91. También se calcularon las tasas de variación de los parámetros de transformación para permitir su uso en una época distinta de la de referencia.

Debido a la relevancia que comienza a tener el GPS en aquel tiempo para la Geodesia y la Geodinámica, el IERS realiza el primer marco de referencia terrestre basado en esta técnica basándose en una combinación con la solución ITRF90. Consistió en utilizar observatorios incluidos en el cálculo de ITRF90 que tuvieran instalado uno o varios GPS. Se utilizaron dos épocas de referencia 1991.0 y 1992.0. En el ajuste se calcularon las coordenadas de las estaciones seleccionadas a partir de la combinación del conjunto ITRF90 y las excentricidades de las estaciones GPS con sus varianzas a priori. Los 7 parámetros de transformación de ITRF90 se pusieron a 0 con objeto de expresar el resultado en su correspondiente sistema de referencia (BOUCHER, y otros, 1992).

Para el cálculo de ITRF91 se incorpora por primera vez las estaciones GPS. En ITRF92 ya se usa estaciones GPS sin que se encuentren ubicadas con otras técnicas de medición. Una destacada muestra de la importancia que comenzaba a tener este tipo de tecnología geoespacial para la Geodesia global. Esta relevancia continuará acrecentándose y afianzándose con los años gracias a la

precisión de sus productos derivados y a la gran difusión a nivel global de las estaciones GPS permanentes.

### **ITRF93**

En la realización ITRF93, se calcula el ajuste por duplicado al considerar dos épocas de referencia (1988.0 y 1993.0). A partir de dichos resultados se calcula las velocidades de las estaciones. Para esta solución se constriñe la orientación del marco, así como sus ratios de cambio a lo largo del tiempo, de modo que sea consistente con las series de parámetros de orientación terrestre (EOP) elaborados por el Earth Orientation Centre (BOUCHER, y otros, 1994). Por tanto, deja de aplicarse la condición de no rotación respecto a los ITRF previos y respecto al modelo NNR-NUVEL1. La solución combinada para las dos épocas de referencia se realiza en dos pasos:

- Primer paso, se calcula un ajuste global con los 7 parámetros de transformación a 0 para una solución basada en SLR. Con ello queda fijado el origen y la escala. Los 3 parámetros de rotación obtenidos mediante esta combinación para 2 soluciones basadas en VLBI se comparan con sus correspondientes desviaciones EOP relativas a los EOP de la solución SLR calculada. A continuación, se realiza la media para las diferencias entre los ángulos de rotación y las desviaciones EOP con las 2 soluciones VLBI.
- Segundo paso, se rota el marco terrestre con los ángulos de rotación medios obtenidos en el paso anterior. Así se consigue que ITRF93 sea consistente con las series EOP del IERS en las dos épocas y quede definida su orientación y evolución temporal.

Respecto a los campos de velocidad, se usa un modelo más reciente, el NNR-NUVEL1A en lugar del NNR-NUVEL1. Puesto que el modelo es horizontal, para que sea consistente con el modelo tridimensional, se asigna velocidad vertical cero, lo que implica un mal funcionamiento en lugares con movimiento vertical importante y en aquellos próximos a los bordes de las placas tectónicas. Esto se minimiza no ponderando las velocidades del modelo para estos lugares. El caso contrario se da en la parte rígida de las placas tectónicas, donde el modelo es consistente con su movimiento.

### **ITRF94**

La realización ITRF94 supone un importante cambio nuevamente en diferentes aspectos. Para la elaboración de este marco se incluye por primera vez datos del sistema DORIS (ALTAMIMI, y otros, 2001). Otro de los aspectos a destacar es que la orientación se constriñe a la de ITRF92 para la época 1988.0 y su evolución temporal sigue el modelo NNR-NUVEL1A (ya empleado en la anterior realización). Con esa orientación se consigue que los EOP sean consistentes con

ITRF94 y el recién establecido ICRF. También es el primer marco donde se obtiene su origen a través de una media ponderada entre las soluciones SLR y GPS, así como su escala que se basa en una media de algunas soluciones VLBI, GPS y SLR (BOUCHER, y otros, 1996). Hasta ahora, el origen y la escala se obtenía exclusivamente a partir de soluciones SLR. Probablemente, el mayor avance de esta realización sea el impacto que tiene para su elaboración el uso de las matrices de covarianzas completas de cada solución, así como la clasificación de los conjuntos de estaciones (SSC) en función de la calidad de sus coordenadas y velocidades. Hasta el momento, las clasificaciones llevadas a cabo hacían referencia a las estaciones prestando atención al sistema de medición (fijo o portátil-móvil), al tipo de punto (marca geodésica o referencia del sistema de medición) o al tiempo de medición (permanente o temporal), todos ellos, criterios no relacionados directamente con la calidad de las observaciones. La clasificación en ITRF94 se realiza en base a los siguientes criterios:

- Clase I: debe existir disponibilidad de posiciones y velocidades con la matriz de covarianzas completa en formato SINEX. La solución global debe tener buena calidad y debería conformarse por todas las estaciones posibles para permitir distintos tipos de soluciones, a saber: A) ajuste combinado de SSC y EOP (solución primaria), B) combinación rigurosa de un SSC usado en A con un conjunto adicional de estaciones manteniendo fijos los EOP resultantes de A (solución de densificación) y C) ajuste con las series EOP fijas (solución autónoma).
- Clase II: resto de soluciones posibles.

La solución final ITRF94 se elabora para las épocas 1988.0 y 1993.0 y se basa en la combinación de las diferentes soluciones individuales de Clase I, donde se incluye soluciones VLBI, GPS, SLR y DORIS. Las soluciones de Clase II se comparan a posteriori con ITRF94. La determinación de la solución requirió un largo proceso puesto que se estableció una estrategia para independizar la solución del modelo geofísico y sin aplicar constreñimientos ERP, con objeto de proporcionar la mejor continuidad posible de la orientación respecto a las anteriores.

Las estaciones también se clasifican en ITRF94 para informar a los usuarios acerca de su calidad. Se lleva a cabo en función de un número de calidad (QN) basado en sus residuos. Define 4 clases:

- A: puntos con QN para las épocas 1988.0 y 1993.0 inferior a 2 cm.
- B: puntos no incluidos en A, pero con QN para 1993.0 inferior a 3 cm.
- C: puntos sin residuos grandes, pero no incluidos en A o B.
- Z: puntos con residuos grandes debidos a errores o determinación pobre.

## **ITRF96**

La siguiente realización es ITRF96 y está en el mismo sistema de la realización anterior. Esta solución combina simultáneamente las posiciones y velocidades de las estaciones utilizando la matriz de varianza-covarianza completa. El esquema de pesos usado se basa en el análisis y estimación de los componentes de la varianza mediante el método Helmert (BOUCHER, y otros, 1998). Hay que destacar también que las velocidades de cada punto dentro de una misma ubicación se constriñen a ser iguales.

La época de referencia para las coordenadas y las velocidades en ITRF96 es la 1997.0.

Las tecnologías empleadas para la solución vuelven a ser VLBI, SLR, GPS y DORIS, contando con más de 500 estaciones distribuidas en 290 ubicaciones diferentes. Se continúa avanzando en conseguir una mejor cobertura del globo, es decir, una mejor distribución en lugares y tecnologías.

## **ITRF97**

En 1997, el primer cambio que se produce es en el significado de la primera letra de ITRFyy, pasa de ser IERS a International. Por tanto, ITRF97 es International Terrestrial Reference Frame 97.

Cada solución individual incluida en la solución combinada ve modificada su calidad de la evaluación por tratarse de un sistema de referencia mínimamente constreñido. La matriz de covarianzas asociada a cada solución de posiciones y velocidades refleja el ruido natural de las observaciones y un efecto del sistema de referencia (RSE). Se plantea aquí el uso de una proyección ortogonal que reemplace el original RSE, presente en la matriz de covarianzas, por otro RSE conocido y pequeño, para todas las soluciones individuales que serán combinadas (BOUCHER, y otros, 1999).

Por otra parte, también se está investigando el hecho de considerar cual es la época más apropiada a la que deberían estar referidas las posiciones. Se trata de analizar si la época única adoptada degrada la calidad interna de la solución. Para salvar esta posibilidad, resulta necesario investigar si la solución completa se vuelve más precisa cuando las posiciones se propagan a sus épocas de mínima varianza para la posición (EMPV) (BOUCHER, y otros, 1999).

Por lo tanto, para superar esta posibilidad, también es necesario investigar si toda la solución se vuelve más precisa si las posiciones se propagan en sus épocas de la variación mínima Posición

Esta realización es una continuación de la anterior en cuanto a metodología y definición y se encuentra en el mismo sistema. Su época de referencia también es 1997.0.

## ITRF2000

Con la realización ITRF2000 se introduce por primera vez la combinación de soluciones sin constreñimientos que son independientes de cualquier modelo de movimiento de tectónica de placas. Únicamente se aplican unos constreñimientos mínimos con objeto de definir el subyacente marco de referencia. El razonamiento que lleva a este nuevo objetivo es tratar de evaluar la calidad real de las posiciones y velocidades de las estaciones proporcionadas por las diferentes tecnologías de geodesia espacial utilizadas. (ALTAMIMI, y otros, 2002). Incluye, como núcleo primario, estaciones observadas mediante VLBI, LLR, SLR, GPS y DORIS, habitualmente utilizadas en versiones anteriores de ITRF. Además, incluye redes regionales de GPS para su densificación.

La definición de su datum queda de la siguiente forma (ITRF, 2016):

- La escala y su tasa de variación se obtiene a partir de una media ponderada de las soluciones VLBI y SLR.
- El origen (traslaciones y tasas de variación) se calcula mediante una media ponderada de las soluciones SLR.
- La orientación queda alineada con ITRF97 en la época 1997.0 y su evolución temporal al modelo geofísico NNR-NUVEL-1A. Con el fin de asegurar una estabilidad en su evolución temporal, la tasa de orientación de ITRF2000 se ha obtenido a partir de una selección de ubicaciones geodésicas de gran calidad.

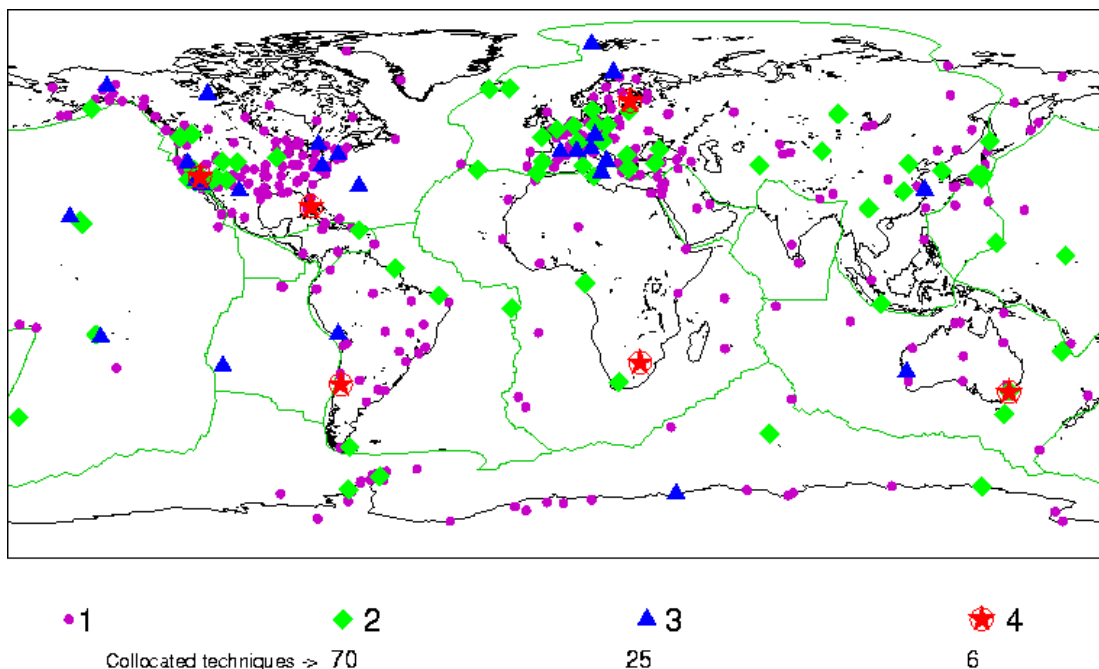


Figura 6.- Mapa de ubicaciones de ITRF2000 (ITRF, 2016)

En la figura del mapa de ubicaciones usadas para la realización IRTF2000, puede verse la importante mejora en la distribución espacial y variedad de

tecnologías geodésicas empleadas respecto a la figura análoga de la BTS84. Esta figura representa cada ubicación con un símbolo que denota el número de tecnologías geoespaciales empleadas y, en una segunda línea, muestra el número correspondiente de ubicaciones con varias tecnologías (70 ubicaciones con 2, 25 con 3 y 6 con 4). Se ha contado con aproximadamente 800 estaciones distribuidas en 500 ubicaciones.

A modo de recapitulación de los avances incorporados por realizaciones anteriores, y para incidir en las diferencias introducidas aquí, se indicará a continuación los pasos de la estrategia de análisis seguida para la generación de ITRF2000 (BOUCHER, y otros, 2004):

- Eliminación de los constreñimientos de las soluciones constreñidas y aplicación de constreñimientos mínimos iguales para todas las soluciones individuales.
- Establecimiento de constreñimientos mínimos para una solución débilmente constreñida.
- Mantenimiento tal y como son de las soluciones de aquellos centros de análisis que realmente han aplicado mínimos constreñimientos.
- Propagación de las posiciones de las estaciones de cada solución individual a su época de mínima varianza para la posición (EMPV).
- Combinación de todas las soluciones juntas con sus vínculos locales (excentricidades de puntos de ubicaciones con varias tecnologías), estimación de los componentes de las varianzas e iteraciones si fueran necesarias.

### **ITRF2005**

Hasta este momento, la generación de un ITRF se ha llevado a cabo a partir de soluciones globales de largo plazo que comprenden las posiciones y velocidades de las estaciones. Dichas soluciones las generaban diferentes centros de análisis utilizando distintos modelos y estrategias.

En ITRF2005 se modifica este concepto, derivando en una realización basada en series temporales, semanales para las técnicas satelitales y diarias para VLBI, de la posición de las estaciones y diarias para los parámetros de orientación terrestres (EOP), todas ellas disponibles en formato SINEX (Solution INdependent EXchange Format) con la información completa de las matrices de varianza-covarianza. Este giro adoptado atiende a estas tres razones principales (ALTAMIMI, y otros, 2007):

- Monitorizar los movimientos no lineales de las estaciones y, en particular, las discontinuidades presentadas por el modelo de tramos anterior.
- Mejorar la consistencia entre el ITRF y los EOP.

- Examinar el comportamiento temporal de los parámetros físicos del marco, es decir, el origen y la escala.

Por vez primera en la historia de ITRF, el ITRF2005 combina, además de las posiciones de las estaciones y sus posiciones, los parámetros de orientación terrestres diarios (EOP) que incluyen el movimiento del Polo, el tiempo universal (UT1) y la duración del día (LOD).

La estrategia adoptada para el cálculo de ITRF2005 se basa en dos pasos:

- Primer paso: establecer una solución combinada de largo plazo por cada técnica geodésica individualmente que comprenda las posiciones de las estaciones para una época de referencia y las velocidades y los EOP diarios.
- Segundo paso: combinar las soluciones resultantes de las cuatro tecnologías conjuntamente con las excentricidades de los puntos de ubicaciones con varias tecnologías.

El datum queda definido del siguiente modo (ALTAMIMI, y otros, 2007):

- El origen se define exclusivamente por la solución de las series temporales de SLR.
- La escala se establece exclusivamente por la solución de las series temporales de VLBI. Esto supone un cambio respecto al anterior, se debe a:
  - Una mayor cobertura temporal de las series VLBI frente a las SLR.
  - Un comportamiento no lineal (con discontinuidades) observado en la escala obtenida mediante SLR. Este método de cálculo ha permitido detectar un sesgo tanto en offset como en tendencia lineal frente a VLBI.
- La orientación se define de forma que sea coincidente con ITRF2000 para la época de referencia 2000.0

Esta nueva estrategia permite la obtención de nuevos productos para los usuarios, como por ejemplo los resultados completos de ITRF2005 o por tecnologías en formato SINEX con las posiciones de las estaciones, las velocidades y los EOP con las matrices completas de varianza-covarianza.

### **ITRF2008**

A pesar de que ITRF2005 supuso una solución mejorada en términos de consistencia interna y robustez respecto a las anteriores realizaciones, salieron a la luz algunas deficiencias de las soluciones de las cuatro tecnologías empleadas, así como su coexistencia en ubicaciones. Para la elaboración de ITRF2008, se

realizaron cuantiosos esfuerzos para mejorar las respectivas soluciones, entre otros (ALTAMIMI, y otros, 2011):

- Reprocesado de la solución IGS utilizando unos nuevos offset absolutos para los centros de fase de las antenas y modelos de variación tanto para las estaciones como para los satélites y un nuevo modelo troposférico.
- Reanálisis de la solución IVS considerando una corrección en la tendencia del polo medio y un modelo de troposfera más avanzado y correcciones para las deformaciones térmicas de las antenas.
- La solución mejorada de ILRS consideró nuevos valores de sesgo del intervalo, un modelo troposférico nuevo y otras correcciones en las estaciones.
- Respecto a DORIS, se utilizaron por primera vez siete centros de análisis para la solución combinada.

La red que compone ITRF2008 está formada por 934 estaciones localizadas en 580 ubicaciones. Aunque ha mejorado mucho desde las primeras realizaciones, la mayor parte de las ubicaciones se encuentran en el hemisferio norte como puede observarse en la figura del mapa de ITRF2008.

En este caso, el datum se vuelve a definir de un modo distinto del anterior, la escala se vuelve a calcular como una media entre la solución VLBI y la SLR. El origen coincidente con la solución SLR y la orientación coincidente con ITRF2005 para la época 2005.0, época de referencia del datum.

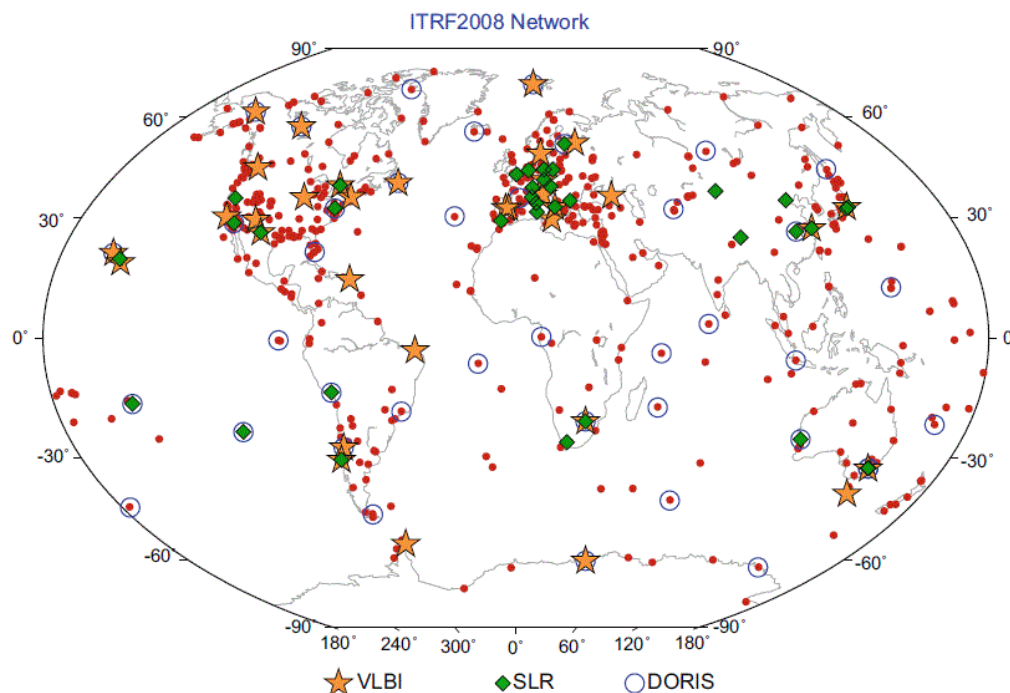


Figura 7.- Mapa de ubicaciones de ITRF2008 (ALTAMIMI, y otros, 2011)

El presente trabajo se ha realizado dentro de este marco de referencia (ITRF2008).

### **ITRF2014**

La última realización existente es ITRF2014, recién publicada. Una de las novedades que presenta es el uso del sistema GLONASS (GLObal NAVigation Satellite System) junto con el GPS en dos centros de cálculo de la solución IGS (ALTAMIMI, y otros, 2016). No es la primera vez que se usa GLONASS, ya se introdujo en ITRF2008, pero sólo una pequeña parte de las observaciones disponibles (ALTAMIMI, y otros, 2012). Por esta razón, la solución anteriormente denominada GPS pasa a ser GNSS.

El volumen de estaciones y ubicaciones empleadas para esta realización continúa la progresión ascendente, 1499 estaciones y 975 ubicaciones.

Al igual que ITRF2005 e ITRF2008, se usan como datos de entrada las series temporales de las posiciones de las estaciones y los EOP proporcionados para cada una de las cuatro tecnologías de geodesia espacial empleadas (VLBI, SLR, GNSS, DORIS). Se ha completado un nuevo reproceso de las diferentes soluciones empleadas.

Las principales innovaciones introducidas en el análisis del marco ITRF2014 están relacionadas con los movimientos no lineales de las estaciones procesadas, se presenta a continuación una breve descripción de las mismas (ALTAMIMI, y otros, 2016):

- Modelización de las señales estacionales de las estaciones de las que se dispone de un periodo suficiente, conseguido mediante la aportación al modelo de los apropiados parámetros (coeficientes) de funciones sinusoidales.
- La denominada deformación postsísmica (PSD) en aquellas ubicaciones afectadas por los principales terremotos, mediante la aplicación de modelos paramétricos que fueron primero ajustados a las series temporales diarias del IGS para la posición de las estaciones.

Para concluir con este marco se indicará su datum:

- Origen con época de referencia 2010.0 obtenido a partir de la solución correspondiente a la tecnología SLR.
- Escala calculada como la media aritmética de las escalas de las soluciones SLR y VLBI para la época 2010.0. Tanto la escala como sus tasas de cambio.
- Orientación coincidente con ITRF2008 en la época 2010.0.

### ***Parámetros de transformación***

A la par que se determinan las sucesivas realizaciones del ITRS, se calculan los parámetros de transformación que las relacionan y permiten pasar de unas a otras. Están basadas en una transformación euclídea de siete parámetros, a saber, tres traslaciones, tres rotaciones y un factor de escala establecidos para una época de referencia indicada. A dichos parámetros se les calcula unas tasas de cambio para permitir la realización de transformaciones en épocas diferentes a la de referencia.

En (ITRF, 2016) pueden encontrarse los parámetros de transformación entre realizaciones y una sencilla guía para su aplicación.

### ***Relación con WGS84***

Para concluir el epígrafe relativo a ITRS, un sucinto repaso a la relación existente entre las realizaciones de ITRS y de WGS84.

Las antiguas realizaciones de WGS84 basadas en el sistema DOPPLER Transit eran iguales a las ITRS en un orden inferior al metro (ITRF, 2016). Las nuevas realizaciones basadas en datos GPS tienen una coincidencia dentro del orden del decímetro. La última realización, denominada G1674 (el número indica la semana GPS usada como época de referencia), adopta las coordenadas ITRF2008 para más de la mitad de sus estaciones de referencia. Esto implica un orden de igualdad del centímetro.

## **2.2.- Redes de Estaciones Permanentes**

Este apartado se centra en el sistema GPS, aunque es extensible a cualquier sistema global de navegación por satélite (GNSS).

Una estación permanente GPS, también denominada estación GPS continua (CGPS), está compuesta básicamente por receptor, antena, suministro de energía ininterrumpido y conexión directa o remota a un ordenador (BIAGI, 2009). Como complemento puede contar con una protección radome para la antena, una estación meteorológica, un reloj atómico, etc.

El principal objeto de una estación permanente consiste en proporcionar las observaciones que realiza a los usuarios para aplicaciones en tiempo real o postproceso. Para ello, debe registrar datos de forma continua (24 horas/365 días al año) con la/s periodicidad/es y formato/s que se estimen oportunos. Éstas variarán en función de las aplicaciones para las que esté destinada la estación permanente.

La monumentación es la conexión estable entre la antena y el terreno, debe establecerse en una ubicación privilegiada y protegida. Privilegiada para evitar obstrucciones a elevaciones superiores a  $5^{\circ}$ - $10^{\circ}$  o interferencias electromagnéticas. Protegida para evitar posibles actos vandálicos. La ubicación de la monumentación, además de ser estable, debe ser duradera y requerir poco mantenimiento. Estas dos últimas características están asociadas a reducir el coste producido por la estación. Sin embargo, la estabilidad, mantener su posición fija a lo largo del tiempo, es un requisito imprescindible puesto que uno de los principales objetivos de la estación es utilizar su posición para la determinación de otras o productos que dependen de la misma.



Figura 8.- CGPS del Politécnico de Milán – Sede Como (BIAGI, 2009)

En aplicaciones como las destinadas a estaciones base de referencia para proyectos de ingeniería, puede ser suficiente una única estación para el desarrollo de la actividad. En estos casos concretos, donde la actuación se desarrolla en el espacio de varios kilómetros, la estación podría incluso prescindir del ordenador de control si el fin exclusivo es emitir correcciones diferenciales a un grupo de receptores móviles vía radio. La comunicación se realiza sólo en un sentido (base  $\rightarrow$  móvil) y no es necesario registrar las observaciones en la estación base. Este ejemplo no es el caso que nos ocupa en este trabajo fin de grado, por lo que no se tratará con mayor detalle esta configuración ni otras más complejas.

Cuando el ámbito de actuación es una zona extensa, se necesita establecer una red de estaciones permanentes. Fundamentalmente estaría compuesta por un conjunto de estaciones permanentes con una distribución homogénea a lo largo del territorio y uno o varios centros de control. Cada estación cuenta con una conexión permanente o a intervalos establecidos con un centro de control, de

forma local o remota. Las funciones básicas de un centro de control son (BIAGI, 2009):

- Gestión y mantenimiento de las estaciones.
- Recolección y almacenamiento de las observaciones.
- Control de calidad de las mismas y su procesado.
- Cálculo de las coordenadas de las estaciones.
- En su caso, distribución a los usuarios de las observaciones y productos elaborados a partir de ellas.

Las redes pueden estar destinadas a uno o varios ámbitos de aplicación y servicio. Los principales son los relacionados con los sistemas de referencia y la geodinámica a distintos niveles (globales, continentales, nacionales o locales), el control de deformaciones o los servicios de posicionamiento.

A continuación, se pasará a describir la red global implicada en el establecimiento de los sistemas de referencia tratados con anterioridad.

### **2.2.1.- International GNSS Service (IGS)**

El International GNSS Service (en adelante IGS) se estableció oficialmente en enero de 1994 como un servicio de la International Association of Geodesy (IAG). Los diferentes cambios de nombre que ha sufrido el IGS a lo largo del tiempo muestran claramente su objetivo principal y la incorporación de nuevos GNSS. Desde junio de 1992 su nombre fue International GPS Service for Geodynamics, clara muestra del objeto de análisis para el que se desarrolló y la tecnología utilizada. A partir de 1999, se pasó a llamar International GPS Service, evidenciando la aplicación de sus estudios y productos a muchos otros campos de investigación. Por último, en marzo de 2005 se estableció el nombre actual con el que se reconoce la diversidad de GNSS actuales y futuros (DOW, y otros, 2009).

En el IGS contribuyen más de 200 instituciones de más de 100 países con sus propios recursos de forma voluntaria y no comercial (IGS, 2016). Su funcionamiento está regido por un mecanismo de autogobierno de los propios miembros a través de la gestión de la Oficina Central (Central Bureau) siguiendo las líneas establecidas por la Junta de Gobierno (Governing Board) (DOW, y otros, 2009).

A modo de declaración de intenciones, la misión del IGS consiste en proveer datos GNSS de alta calidad y productos elaborados con ellos para contribuir en el marco de referencia terrestre, cálculo de la rotación terrestre, observaciones terrestres e investigación, posicionamiento, navegación y tiempo y otras aplicaciones en beneficio de la sociedad. Además, ha establecido los estándares para las redes de estaciones permanentes a todos los niveles, éstas pueden consultarse en el documento IGS Site Guidelines (IGS, 2015).

La red IGS está compuesta por alrededor de 400 estaciones permanentes distribuidas por todo el Mundo. Para el control, seguimiento y análisis de la red se sirve de diferentes Centros de Análisis, Grupos de Trabajo, Proyectos Piloto y una Oficina Central de Coordinación.

Como consecuencia de las condiciones tan especiales y específicas que deben superar las estaciones de la red IGS para cumplir con los estándares de la misma (IGS, 2015), gran parte de ellas están ubicadas en centros de investigación donde existe algún otro sistema de medición espacial (VLBI, SLR, DORIS, etc.). Algunas estaciones singulares, como por ejemplo debido a su ubicación geográfica, podrían excepcionalmente formar parte de la red sin cumplir con todos los requisitos establecidos por los estándares del IGS. En tal caso, quedarían identificadas para advertir a los usuarios de dicha particularidad.

El IGS recopila, almacena y distribuye observaciones GPS y GLONASS con una precisión suficiente como para abarcar un amplio abanico de usuarios tanto científicos como de ingeniería. Ejemplos destacados de uso son (DOW, y otros, 2009):

- Mejora y ampliación del marco internacional de referencia terrestre (ITRF).
- Control de deformaciones terrestres.
- Control de las variaciones en el nivel oceánico y capa de hielo.
- Control de las variaciones de la capa de hielo.
- Control de las variaciones de rotación terrestre.
- Determinación de órbitas de satélites científicos.
- Seguimiento de la troposfera e ionosfera.

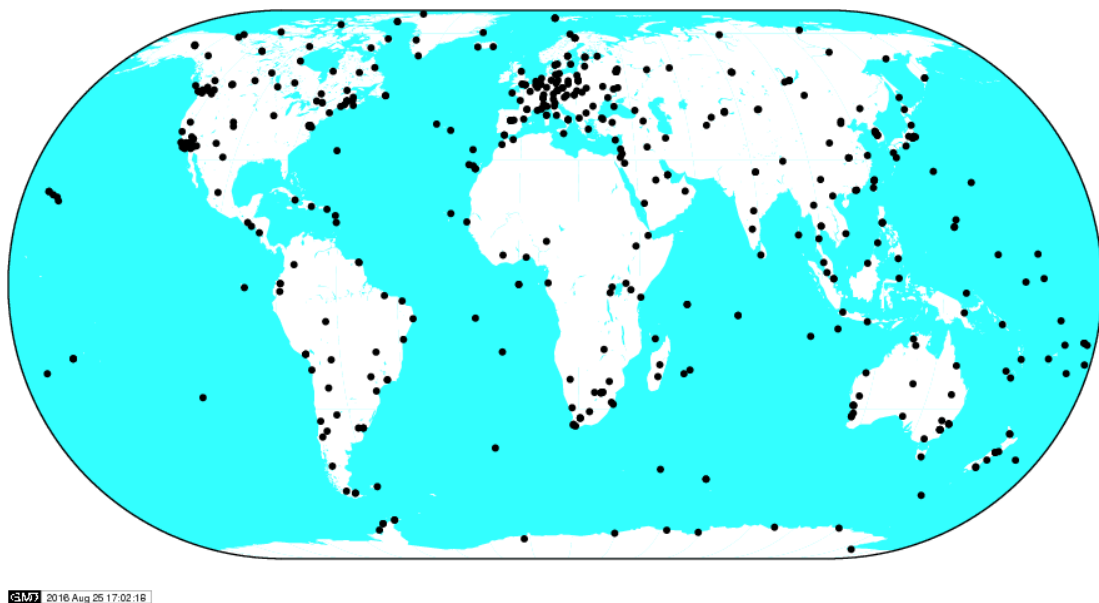


Figura 9.- Estaciones permanentes de la Red IGS (IGS, 2016)

El IGS supone un importante organismo para la investigación y el desarrollo de las técnicas GNSS. Además de proveer a los usuarios de los datos recopilados de sus estaciones, elabora productos a partir del procesado y análisis de dichos datos (IGS, 2016):

- Efemérides de los satélites GPS y GLONASS.
- Información de los relojes de los satélites y estaciones GPS.
- Coordenadas geocéntricas y velocidades de las estaciones.
- Información de la rotación terrestre.
- Parámetros atmosféricos (modelos troposféricos e ionosféricos).

Mediante un servicio de ftp es posible obtener los productos elaborados por el IGS, organizados por semana GPS. Como se indicará más adelante en este documento, los productos del IGS necesarios para la realización de este trabajo son:

- Las órbitas finales, ficheros en formato SP3 (\*.sp3).
- El estado de los relojes, tanto de los satélites como de las estaciones. Estos ficheros se encuentran en formato RINEX para relojes (\*.clk).
- Los parámetros de rotación terrestres, donde quedan recogidos el movimiento polar, la tasa de variación del movimiento polar y la duración del día. El formato es ERP (\*.erp).

El formato utilizado para cada uno de ellos es estándar y puede encontrarse su descripción en la propia web del IGS.

En la siguiente tabla se muestra, a modo de ejemplo, los distintos productos que elabora el IGS para el sistema GPS, su periodicidad y precisiones.

**GPS Satellite Ephemerides / Satellite & Station Clocks**

| Type                         |                    | Accuracy                   | Latency       | Updates               | Sample Interval          |
|------------------------------|--------------------|----------------------------|---------------|-----------------------|--------------------------|
| Broadcast                    | orbits             | ~100 cm                    | real time     | --                    | daily                    |
|                              | Sat. clocks        | ~5 ns RMS<br>~2.5 ns SDev  |               |                       |                          |
| Ultra-Rapid (predicted half) | orbits             | ~5 cm                      | real time     | at 03, 09, 15, 21 UTC | 15 min                   |
|                              | Sat. clocks        | ~3 ns RMS<br>~1.5 ns SDev  |               |                       |                          |
| Ultra-Rapid (observed half)  | orbits             | ~3 cm                      | 3 - 9 hours   | at 03, 09, 15, 21 UTC | 15 min                   |
|                              | Sat. clocks        | ~150 ps RMS<br>~50 ps SDev |               |                       |                          |
| Rapid                        | orbits             | ~2.5 cm                    | 17 - 41 hours | at 17 UTC daily       | 15 min                   |
|                              | Sat. & Stn. clocks | ~75 ps RMS<br>~25 ps SDev  |               |                       | 5 min                    |
| Final                        | orbits             | ~2.5 cm                    | 12 - 18 days  | every Thursday        | 15 min                   |
|                              | Sat. & Stn. clocks | ~75 ps RMS<br>~20 ps SDev  |               |                       | Sat.: 30s<br>Stn.: 5 min |

*Tabla 1.- Productos del IGS relativos al sistema GPS (IGS, 2016)*

### 2.2.2.- Proyecto Topo-Iberia

El proyecto “Geociencias en Iberia: Estudios integrados de topografía y evolución 4D. ‘Topo-Iberia’” fue financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (DE LACY, y otros, 2014). Se trata de un proyecto de investigación multidisciplinar y multiinstrumental en el ámbito de las Ciencias de la Tierra en el que participan diversas universidades (Autónoma de Barcelona, Barcelona, Cádiz, Complutense de Madrid, Granada, Jaén y Oviedo), el Instituto de Ciencias de la Tierra Jaime Almera (CSIC), el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y el Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) (TOPOIBERIA, 2014).

El objeto de estudio de Topo-Iberia es la interacción entre procesos profundos, superficiales y atmosféricos en el micro-continente formado por la Península Ibérica y sus márgenes. Para ello, integra investigaciones en geología, geofísica, geodesia y geo-tecnología. Mediante estrategias de interpretación conjunta, pretende configurar una base de datos y resultados multidisciplinarios que permita resolver los interrogantes actualmente existentes.

Las actuaciones a nivel regional se llevan a cabo en tres zonas o ámbitos: sur, centro y norte. En el sur: los orógenos de Béticas-Rif y Atlas, y los dominios marinos intermedios del prisma de acreción del Golfo de Cádiz y la cuenca del Mar de Alborán. En el centro: Meseta, Sistema Central y Sistema Ibérico, incluyendo las cadenas Costeras Catalanas y cuencas del levante peninsular. En el Norte: Cordilleras Cantábrica y Pirenaica, incluyendo cuencas del Duero y Ebro, y márgenes Cantábrico y Galaico.

La línea de investigación que nos interesa para este trabajo es la de mediciones de la deformación terrestre mediante GPS. Se ha materializado una red de 26 estaciones GPS permanentes, 22 de las cuales en territorio español y 4 en Marruecos. Actualmente la red está compuesta por 25 estaciones (21+4). Se ha combinado la instalación de estaciones nuevas (ejemplo en la siguiente figura) con otras existentes pertenecientes a instituciones como EUREF, IGS y Agencias Regionales de Gobierno. Todas las estaciones son sistemas autónomos, las ubicadas en lugares aislados cuentan con un panel solar, dos baterías y un módem GPRS para dotarlas de energía y transmitir la información. La red se completó en el año 2008 (DE LACY, y otros, 2014).

Una red de este tipo permite la monitorización de áreas tectónicamente activas y la detección de movimientos relativos. Para el caso de la Península Ibérica, estos movimientos son de una magnitud inferior al centímetro por año.

La red de estaciones permanentes está integrada en la plataforma multiinstrumental y pluridisciplinar denominada Iber-Array. Los datos de las estaciones no están disponibles para el público en general, salvo los correspondientes a las estaciones que pertenecen a redes internacionales o regionales.



*Figura 10.- Estación TGIL de la red Topo-Iberia (DE LACY, y otros, 2014)*

Los datos recabados por todas las estaciones que integran la red se analizan en tres centros independientes, a saber, el Real Instituto y Observatorio de la Armada, la Universidad de Barcelona y la Universidad de Jaén. Cada centro usa un programa científico y un enfoque diferentes para el procesado de los datos, GIPSY-OASIS, GAMIT y BERNESSE respectivamente (GARATE, y otros, 2015).

Una vez que cada grupo de análisis obtiene su solución para las coordenadas y las velocidades, es necesario transformarlas a un marco de referencia regional común. Nuevamente cada uno opera con un enfoque diferente, aunque todos utilizan las mismas 30 estaciones pertenecientes a EPN (EUREF Permanent Network) para ello. Para asegurar la consistencia entre las tres estimaciones realizadas, se lleva a cabo una última transformación mediante el módulo VELROT v1.01 de comparación y combinación de los campos de velocidades incluido en GAMIT. Con ello se obtiene tres soluciones consistentes y fijadas a ITRF2008.

Una vez verificada la consistencia de las soluciones, se realiza el último paso para alcanzar la solución única, se calcula una media de los campos de velocidad usando el módulo VELROT (GARATE, y otros, 2015).



### **3.- Presa del Arenoso**

Los trabajos desarrollados en este documento se han llevado a cabo en la presa del Arenoso. Por ello, se dedica este capítulo completo a la descripción de la misma como obra de ingeniería, para repasar a continuación los trabajos de control de estructuras efectuados con anterioridad.

#### **3.1.- Descripción de la presa**

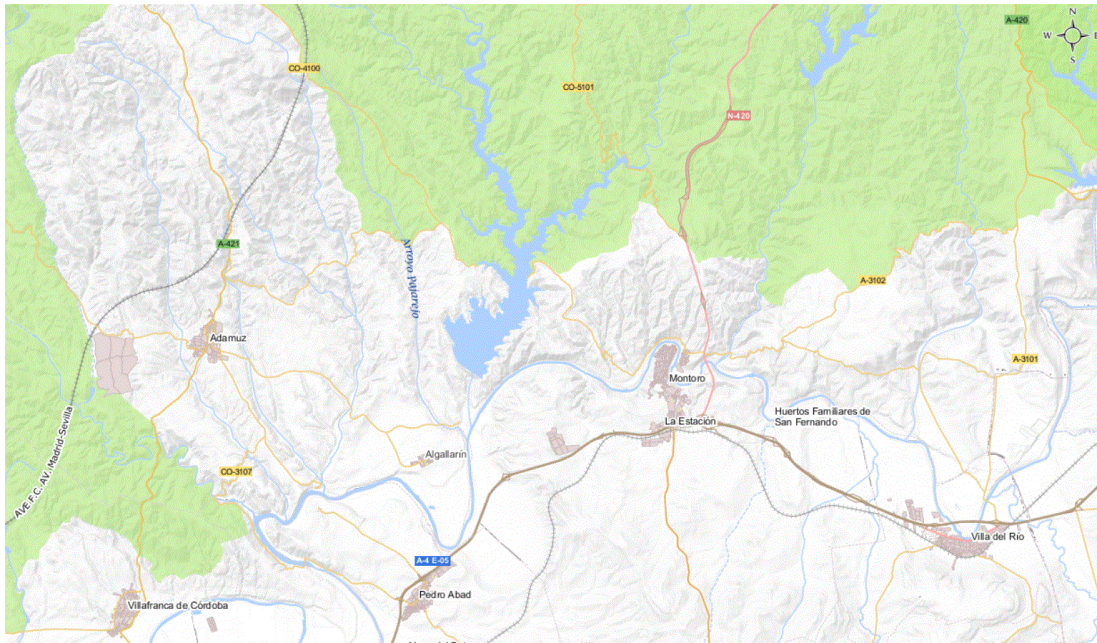
La presa del Arenoso está situada en el término municipal de Montoro (Córdoba) sobre el río Arenoso, el cual es un afluente del río Guadalquivir por su margen derecha. Se accede a ella desde la autovía A-4 salida 364 (ROMERO, y otros, 2007).

Las dos siguientes figuras muestran la ubicación de la presa respecto a las poblaciones más próximas, el río Guadalquivir y la autovía A-4. La primera de ellas en un mapa generado directamente con el [visor IDEAVisor](#) de la infraestructura de datos espaciales de la Junta de Andalucía. Los datos representados corresponden al mapa topográfico a escala 1:25 000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN). La segunda figura está generada con el programa Quantum GIS utilizando igualmente datos del IGN. En este caso se ha realizado una visualización mediante WMS (Web Map Service) a la capa de ortofotografías “PNOA máxima calidad” y se ha añadido los topónimos de las principales poblaciones extrayéndolos de la Base Topográfica Nacional a escala 1:25 000 (BTN25).

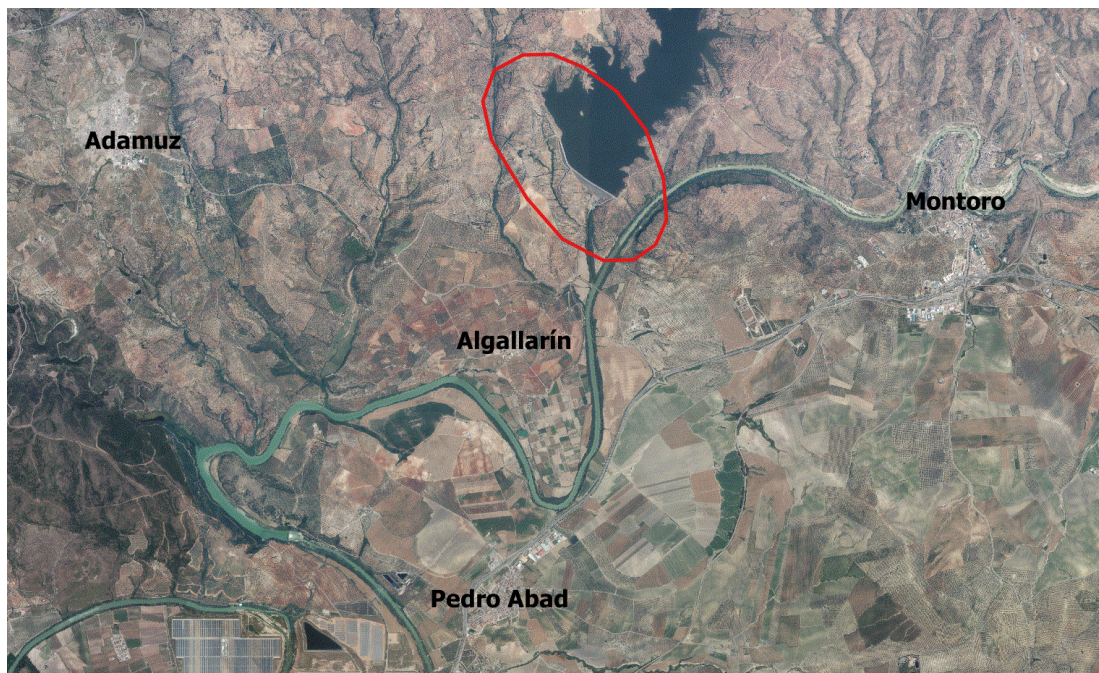
Un modo muy interesante para conocer la presa es visitar la web Presas y Embalses de Andalucía (SANCHO, y otros, 2015), con abundantes fotografías aéreas y datos técnicos de la misma.

El objeto de esta presa es regular las aportaciones del río Arenoso y laminar las avenidas que se produzcan en el mismo. Además, contribuye a la regulación del río Guadalquivir mediante el bombeo desde éste hasta el embalse. Cuenta con una central hidroeléctrica que permite optimizar energéticamente todo el proceso de regulación llevado a cabo (ROMERO, y otros, 2007).

Puesto que el proyecto está enfocado en las deformaciones del cuerpo de la presa, a continuación, se realizará una breve descripción de sus dimensiones, sección y materiales.



*Figura 11.- Mapa de situación de la Presa del Arenoso*



*Figura 12.- Ortofotografía de situación de la Presa del Arenoso*

La presa de Arenoso es de tipo por gravedad de materiales sueltos. Las construcciones por gravedad utilizan su propio peso para contrarrestar el empuje horizontal generado por el volumen de agua embalsada. Se trata de materiales sueltos puesto que no se ha aplicado ningún tipo de conglomerante químico, sólo se aplican procedimientos de compactación. En este tipo de construcciones, el

resguardo entre la cota de coronación de la presa y el máximo nivel normal del embalse es fundamental puesto que no se permiten vertidos por encima de la coronación, debido a su naturaleza de materiales sueltos.

La máxima altura de la presa sobre el cimiento es unos 80m y tiene una longitud de 1481m en coronación. Para su construcción se ha utilizado un volumen de materiales superior a los tres millones de metros cúbicos.



*Figura 13.- Ortofotografía PNOA de la Presa del Arenoso*

El cuerpo de la presa tiene una sección de núcleo central y espaldones de escollera. El núcleo está formado por materiales arcillosos y se compone de una zona central de mayor impermeabilidad y taludes 0.2H:1V con unas protecciones laterales de todo-uno arcilloso de taludes más tendidos 0.5H:1V. Su construcción se realizó mediante tongadas de 0.30m compactadas al 100% del proctor normal (P.N.). Aguas abajo, el núcleo está protegido por un filtro-dren colocado en tongadas de 0.60m y una compactación del 95% P.N., con el que se recogen las posibles infiltraciones. Aguas arriba del núcleo se ha colocado un material de transición de igual compuesto que los espaldones, pero de menor granulometría. (ROMERO, y otros, 2007)

Los espaldones se han ejecutado con grauvacas en tongadas de 0.80m de espesor y compactadas en 8 pasadas. El espaldón aguas arriba está protegido con escollera. Éste se ha construido con caliza y tamaños próximos a 1.0m, aunque la mayor parte del material era más pequeño para servir de recebo a los diámetros mayores. Aguas abajo, en su parte más baja, también se ha colocado

escollera de gran permeabilidad para permitir la salida de las aguas infiltradas en la presa y las de una posible crecida del río Guadalquivir.



*Figura 14.- Panorámica de la presa desde V-100*

La ataguía ejecutada al inicio de las obras para desviar el río y conseguir una zona seca de trabajo, se llevó a cabo con una sección análoga a la descrita para el cuerpo de la presa. Éste elemento quedó integrado dentro del cuerpo, rellenando el espacio existente con la zona de transición del cuerpo principal con un conglomerado de todo en uno.

Los taludes finales son de 1.7H:1V con una serie de bermas. Aguas abajo cuenta con dos bermas de 3m de ancho y aguas arriba con una de 27.5m que coincide con la ubicación de la ataguía (ROMERO, y otros, 2007).

### **3.2.- Trabajos Previos**

Durante la construcción de la presa se tomaron las medidas oportunas para la auscultación de la misma. Se instalaron diferentes sistemas como son (ROMERO, y otros, 2007):

- Piezómetros de cuerda vibrante, para controlar las presiones intersticiales tanto en el cuerpo de la presa como en la roca del cimiento en la galería perimetral.
- Células de presión total de cuerda vibrante, para la medida de presiones totales en el cuerpo de la presa.
- Inclínómetros y anillos magnéticos de asiento, para detectar movimientos, ubicados en las bermas y coronación.

Como puede observarse son sistemas propios de la geotécnica y fuera del alcance y objetivos del presente trabajo. Las labores de auscultación llevadas a cabo para este documento se apoyan en elementos topográficos construidos posteriormente para este fin.

### 3.2.1.- UTE Técnicas Reunidas – PYCSA

Este documento se centra en las medidas adoptadas posteriormente como son la instalación de vértices topográficos exteriores a la obra y varias líneas de clavos de nivelación en las bermas de aguas abajo y coronación.

La UTE Técnicas Reunidas – PYCSA realizó nivelaciones utilizando el método del punto medio y cerrando las líneas con un nivel óptico Nikon AC-2SG (FRANCO-MORENO, 2009). A priori podría parecer un mal sistema de auscultación debido a la poca precisión del nivel empleado (2mm por kilómetro), pero la realidad es que inicialmente este tipo de construcciones tiene unos asentamientos muy superiores a esa magnitud y, por tanto, perfectamente detectables.

Como ejemplo se incluirá una de las gráficas mostradas en (FRANCO-MORENO, 2009), correspondiente a la línea situada en la coronación de la presa aguas abajo. Los asentamientos mostrados son a origen, la cota de referencia siempre es la observada en la primera campaña. Aun así, se observa unos asentamientos cercanos a los 120mm en tan solo 5 meses.

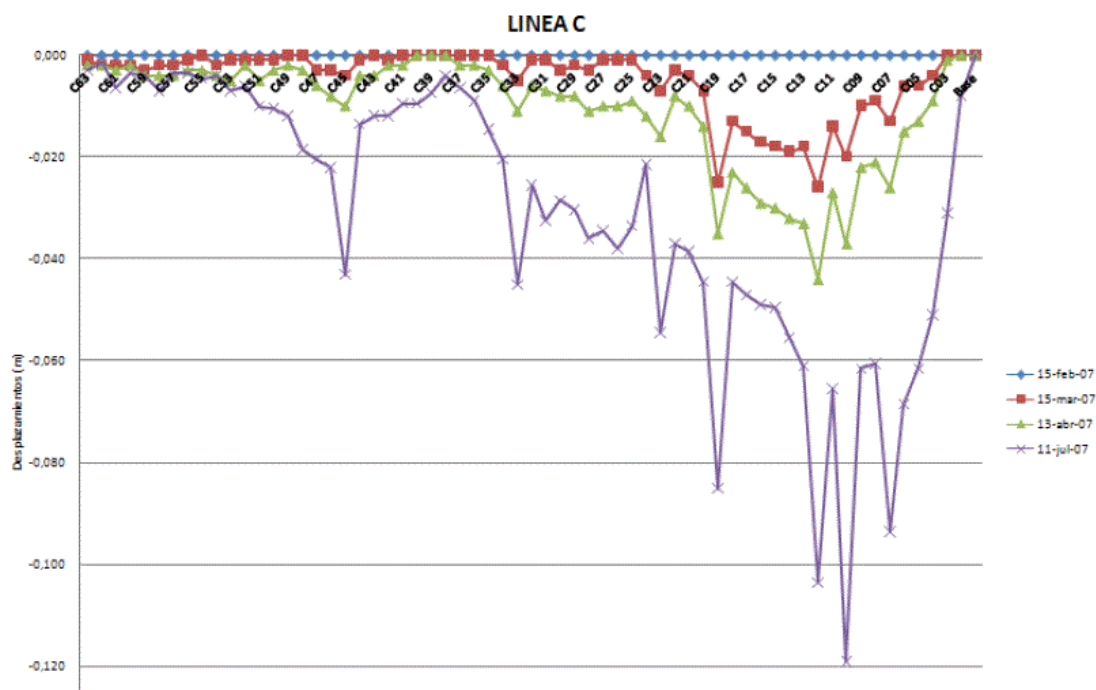


Figura 15.- Gráfica de asentamientos iniciales (FRANCO-MORENO, 2009)

Retomando la idoneidad del equipo utilizado en estos primeros momentos tras finalizar la construcción, la gráfica muestra un comportamiento homogéneo a lo largo de las tres campañas de control realizadas.

En cualquier modo, estos valores no se utilizarán con posterioridad, tan solo servirán para la toma de decisiones durante el diseño de los trabajos a realizar a continuación (FRANCO-MORENO, 2009).

### **3.2.2.- Campañas de 2008**

Tras los controles descritos en el apartado anterior, Óscar Daniel Franco Moreno realizó dos nuevas, más completas y precisas campañas para la elaboración de su proyecto fin de carrera en la Universidad de Jaén para la obtención del título de Ingeniero Técnico de Topografía.

Sobre las bases establecidas en este proyecto se apoya el presente trabajo, por tanto, se detallará y describirá con mayor profundidad tanto los medios usados como los resultados obtenidos. El objetivo de este trabajo es mucho más ambicioso que los trabajos previos señalados, no sólo se busca detectar los desplazamientos verticales mediante una nivelación de precisión, sino que también se observa con equipos GPS para determinar los posibles desplazamientos horizontales en caso de producirse.

En las dos campañas realizadas se completaron una nivelación y observaciones GPS con el instrumental y los medios necesarios para alcanzar unos resultados de precisión. Las campañas se efectuaron a lo largo de febrero de 2008 la primera y la segunda en julio de 2008.

#### **3.2.2.1.- Nivelación**

La nivelación se ha realizado a lo largo de cuatro líneas independientes ubicadas y denominadas de la siguiente forma:

- Línea A: situada en la berma inferior del talud de aguas abajo del cuerpo de la presa. La identificación de estos clavos es naturalmente iniciando su nombre por la letra A. Su longitud ronda los 220m.
- Línea B: ubicada en la berma superior del talud de aguas debajo del cuerpo de la presa. El nombre de sus clavos comienza por B. Su longitud es aproximadamente de 640m.
- Línea C: se desarrolla a lo largo de la coronación de la presa en su borde aguas abajo. La denominación de los clavos se realiza mediante la C. Su longitud aproximada es de 1250m.
- Línea CI: se encuentra en la coronación en su borde aguas arriba. Sus clavos se muestran comenzando por CI. No se indica longitud

puesto que se obtiene a través de la otra línea de la coronación como se verá más adelante.

Los clavos de nivelación están anclados 40cm al terreno y protegidos por un cajetín plástico. Durante estos trabajos se incrementó el número de puntos, debido a que las líneas originales no contaban con puntos exteriores a la zona de afección, o al menos, en lugares presuntamente estables. A saber (FRANCO-MORENO, 2009):

- Línea A: añadido el punto A00 a la entrada de una de las galerías.
- Línea B: incluidos dos puntos, uno junto a una farola en el camino de acceso a la berma, B00, y el otro en el muro del aliviadero, B32.
- Línea C: se han construido dos, una sobre uno de los muros del aliviadero, C00, y la otra en la rotonda de acceso a la presa, C64.

Las observaciones se llevaron a cabo con un nivel digital Leica DNA03 (0.3mm/km en doble nivelación), miras invar y trípode de madera de patas fijas. Para las niveladas que excedían la distancia máxima definida, se utilizó una base para mira (sapo).

Requisitos adoptados para la realización de la nivelación:

- Las líneas se tomarán de ida y vuelta.
- El método de observación será el de punto medio.
- La diferencia entre las distancias de la observación de frente y la de espalda de un estacionamiento no puede exceder los 3cm.
- Cada observación se realiza un mínimo de 5 veces y se le aplica un filtro de desviación típica máxima para poder aceptarla.
- En cada estacionamiento se realiza una serie Espalda-Frente más Frente-Espalda (EFFE). Ambas parejas deben ser independientes entre sí y no superar una diferencia máxima establecida mediante la fórmula siguiente, donde  $k$  es la distancia observada en kilómetros:

$$Tolerancia(k) = 0.3mm * \sqrt{k} \quad [2]$$

- No se aceptan medidas situadas en los 40cm inferiores ni superiores de las miras, es decir, las medidas realizadas en los extremos están descartadas. No es problema en estas campañas puesto que son muy horizontales, no hay que salvar desniveles considerables.

A continuación, se incluirán las gráficas de resultados obtenidas en las dos campañas llevadas a cabo por el compañero Óscar Franco (FRANCO-MORENO, 2009). Los análisis y comparaciones con los resultados obtenidos para este trabajo se efectuarán en apartados posteriores.

En la línea de nivelación A se adopta como punto estable de referencia el A00, materializado y diseñado en la realización de este proyecto. Los puntos

observados en esta berma son A00, A01, A02, A03, A04, A05, A06, A07, A08, A09, A10 y A11.

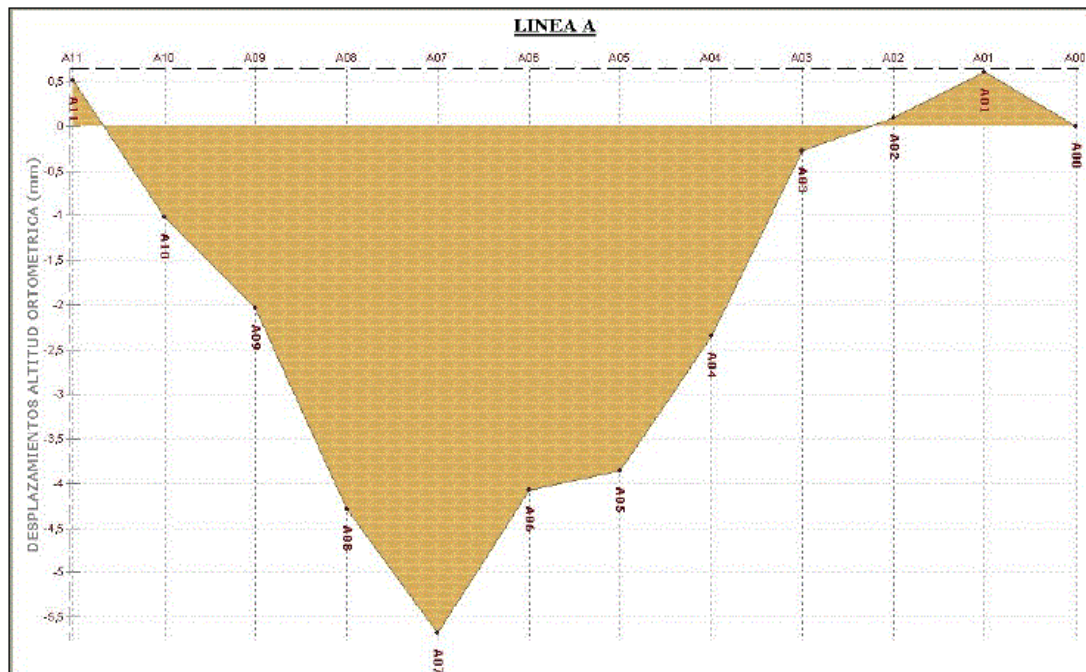


Figura 16.- Resultados nivelación campañas 2008 para la línea A

Para la línea B, el clavo de partida de la nivelación es B00. El conjunto de puntos nivelados en esta línea es el siguiente: B00, B02, B03, B04, B05, B06, B07, B08, B09, B10, B11, B12, B13, B14, B15, B16, B17, B18, B19, B20, B21, B22, B23, B24, B25, B26, B27, B28, B29, B30 y B32.

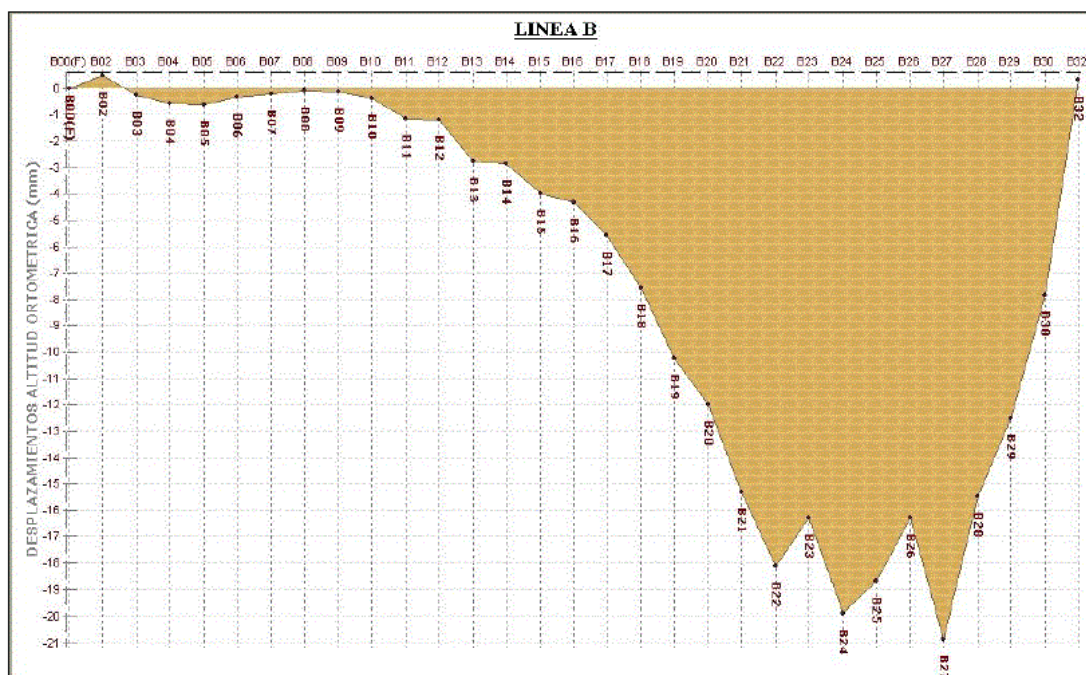


Figura 17.- Resultados nivelación campañas 2008 para la línea B

En cuanto a la línea C, el clavo de origen es C00. También será la referencia para la nivelación de la línea CI, ya que sus cotas se extraen como ramales de la línea C. El listado de puntos observados en C es el siguiente: C00, C02, C03, C04, C05, C06, C07, C08, C09, C10, C11, C12, C13, C14, C15, C16, C17, C18, C19, C20, C21, C22, C23, C24, C25, C26, C27, C28, C29, C30, C31, C32, C33, C34, C35, C36, C37, C38, C39, C40, C41, C42, C43, C44, C45, C46, C47, C48, C49, C50, C51, C52, C53, C54, C55, C56, C57, C58, C59, C60, C61, C62, C63 y C64.

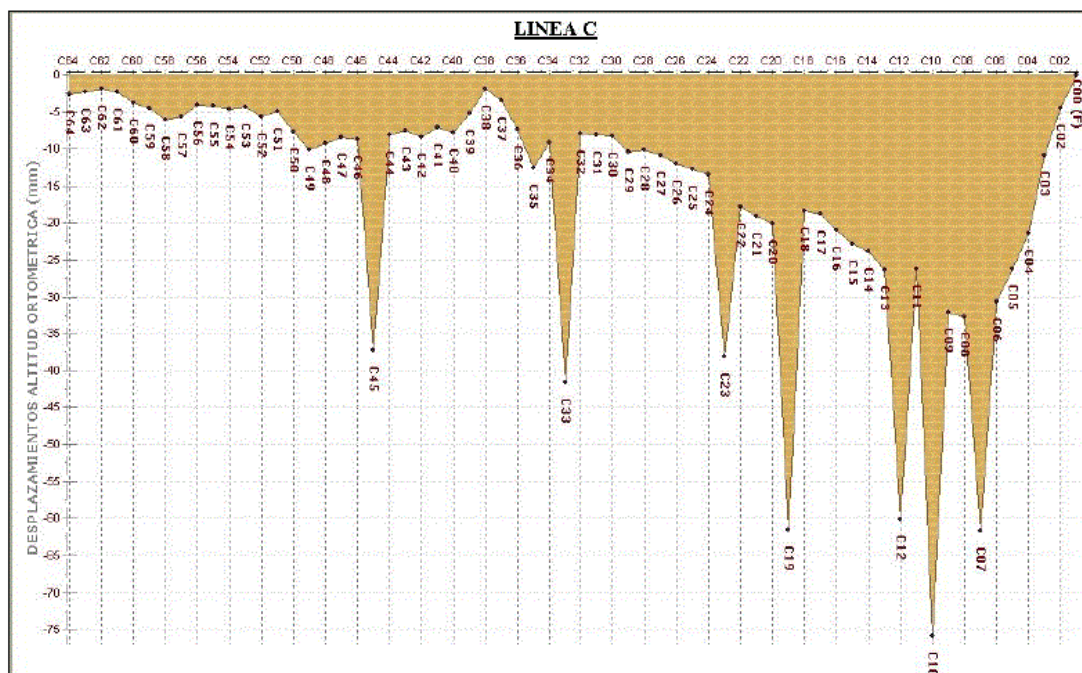


Figura 18.- Resultados nivelación campañas 2008 para la línea C

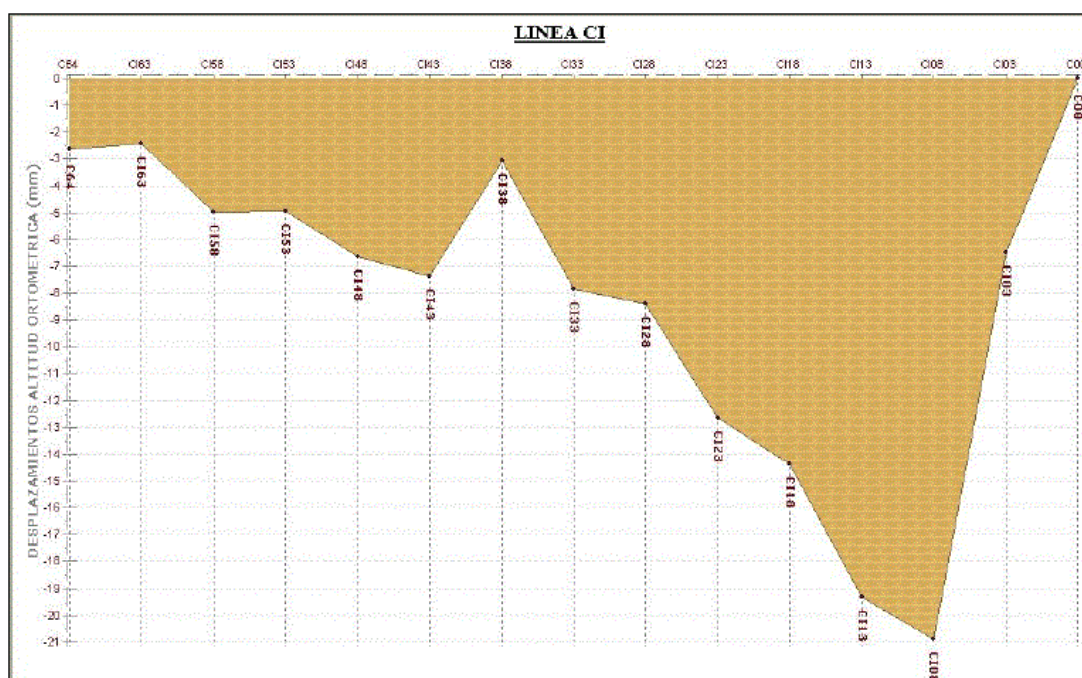


Figura 19.- Resultados nivelación campañas 2008 para la línea CI

Para concluir con la nivelación, el listado de puntos de la línea CI: CI03, CI08, CI13, CI18, CI23, CI28, CI33, CI38, CI43, CI48, CI53, CI58 y CI63.

Señalar que la tolerancia indicada para cada estacionamiento es la que asegura el fabricante para su equipo. En estas campañas cada estacionamiento observaba una base a la espalda y otra al frente, situándose en el centro de las mismas, salvo contadas excepciones. Pero esta tolerancia se cambió para el total de la nivelación para recoger otros errores que intervienen en la nivelación. La tolerancia adoptada fue:

$$Tolerancia(k) = 0.6mm * \sqrt{k} \quad [3]$$

### 3.2.2.2.- GPS

El instrumental empleado en las campañas GPS es un conjunto de seis receptores Leica GX 1200 con antena AX1202, identificados como G1, G2, G3, G4, G5 y G6.

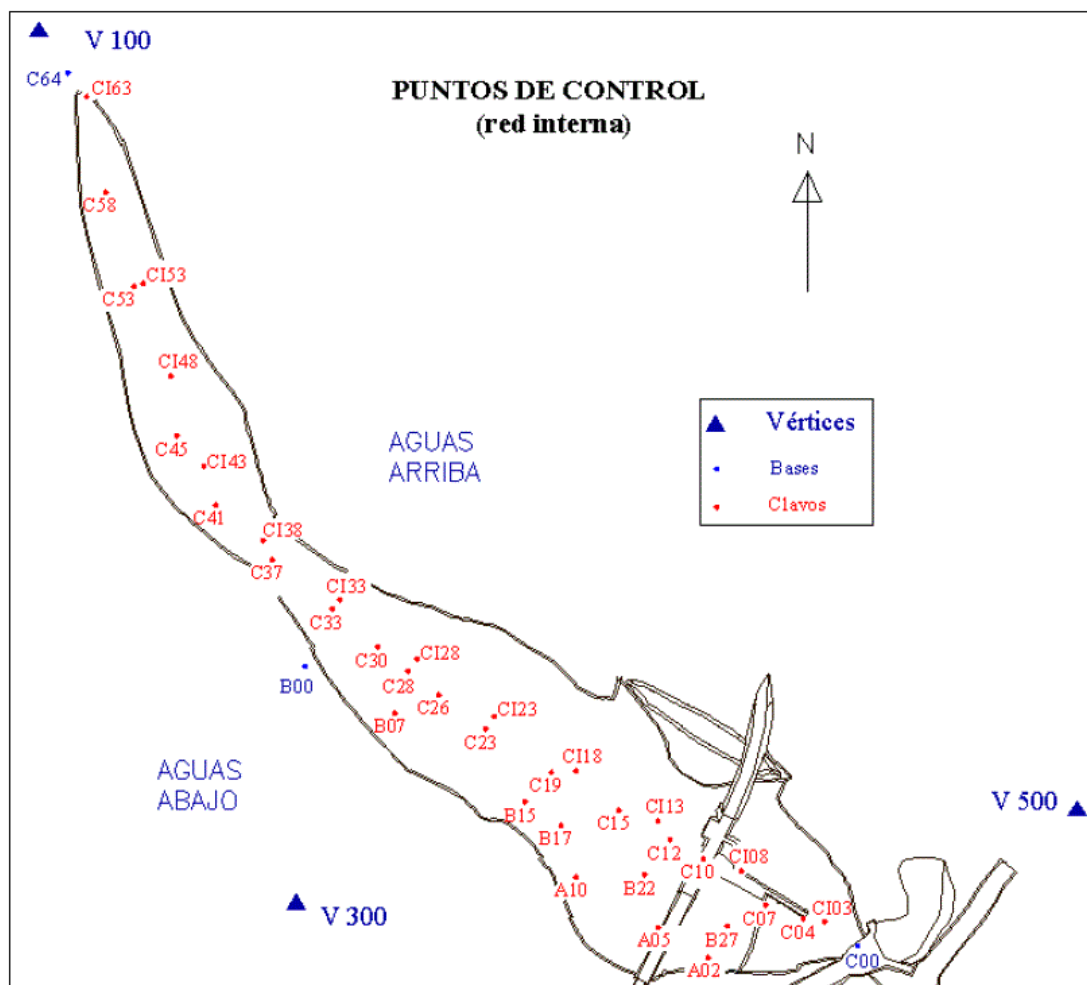


Figura 20.- Planta de las campañas GPS 2008 (FRANCO-MORENO, 2009)

Cada campaña está compuesta por 5 días completos (24 horas) de observaciones en modo estático donde se emplean 3 receptores para la red externa de referencia y otros 3 que se irán colocando en los puntos a controlar en la presa.

Teniendo presente los condicionantes operativos relacionados con el número de equipos, tiempo disponible y personal, se priorizó unas zonas respecto a otras para aprovechar al máximo los recursos. Se dotó de mayor importancia a las zonas con mayores desplazamientos observados en los trabajos previos realizados por la UTE Técnicas Reunidas – PYCSA. Esto lleva a emplear el mayor tiempo posible en aquellas zonas donde es posible detectar desplazamientos horizontales.

La red externa está compuesta por 3 vértices topográficos con centrado forzoso ubicados fuera del ámbito de la presa. Se trata de V100, V300 y V500 y en ellos las observaciones se realizan de forma ininterrumpida durante la campaña completa. El intervalo establecido entre observaciones para su registro es de 5 segundos y la máscara de elevación de 10°.

Los puntos seleccionados siguiendo los condicionantes descritos anteriormente son:

- Línea A: A02, A05 y A10.
- Línea B: B00, B07, B15, B17, B22 y B27.
- Línea C: C00, C04, C07, C10, C12, C15, C19, C23, C26, C28, C30, C33, C37, C41, C45, C53, C58 y C64.
- Línea CI: CI03, CI08, CI13, CI18, CI23, CI28, CI33, CI38, CI43, CI48, CI53 y CI63.

Para la observación de los puntos se definieron dos tipos de sesiones:

- Sesiones nocturnas: se realizaron 5 sesiones de 12 horas en 3 puntos cada una. La elección de estos puntos estuvo marcada por las a priori zonas con mayores desplazamientos en la coronación, resultando los puntos C00, C07, C12, C23, C28, C33, C45, C53, C64, CI08, CI13, CI18, CI28, CI38 y CI48.
- Sesiones diurnas: cada punto seleccionado se observó en 2 o 3 sesiones de diferentes días. Su duración fue de 2 horas y los puntos seleccionados para 3 sesiones C04, C10, C15, C19, C26, C30, C37, C41, C58, CI03, CI23, CI33, CI43, CI53 y CI63. Mientras que estos se observaron 2 sesiones A02, A05, A10, B00, B07, B15, B17, B22, y B27.

Con el software Leica Geo Office se depura las observaciones y transforman al formato RINEX, para su posterior procesado con el programa Bernese 5.0. Se han

utilizado efemérides precisas, parámetros de rotación terrestre y los offset de los centros de antena de los modelos empleados.

Por otra parte, se ha descargado los datos de 4 CGPS pertenecientes al IGS para fijar la red externa a ITRF2005. Estas estaciones son Villafranca (VILL), San Fernando (SFER), Rabat (RBAT) y Cagliari (CAGL). Mediante sus vectores de velocidad se traslada las coordenadas a la época central de la primera campaña y se dota de coordenadas ITRF2005 al vértice V100. A partir de estas coordenadas obtenidas para V100, se calcula las coordenadas de V300 y V500, y así queda establecida la red externa.

Una vez encuadrada la red externa en el marco ITRF2005 se procesa los puntos de control, para ello se usa la siguiente estrategia de procesado (FRANCO-MORENO, 2009):

- Solución L3 con ambigüedades enteras.
- Método SIGMA para resolución de ambigüedades.
- Efemérides precisas.
- Observaciones ponderadas con la función  $\frac{1}{\cos Z}$ , donde Z es la cenital del satélite.
- Modelo troposférico de Saastamoinen con función de Niell.

A continuación, se ajusta cada campaña utilizando el software NETGPS usando como estación fija el V100.

Al procesar siguiendo la misma estrategia y procedimiento para la segunda campaña, se detecta que la red externa no es tan estable como se consideró a priori, hecho que obliga a realizar diferentes pruebas para determinar si alguno de los vértices es suficientemente estable.

Finalmente, tras analizar los resultados de las pruebas, se considera que el punto C00 podría ser más estable que los vértices. Esto implica una serie de modificaciones que suponen el cálculo de la red externa a partir de C00.

Se ha incluido la figura de desplazamientos planimétricos resultantes para los puntos de la línea C como muestra de la obtención final de unos resultados coherentes con lo esperado. La figura se ha extraído de (FRANCO-MORENO, 2009).

En su análisis comparativo de los dos métodos de auscultación aplicados se extrae que son coherentes entre sí. Además, es importante señalar que los valores observados son de un orden considerable debido a que la presa estaba recién construida y no se había producido aún su primer llenado.

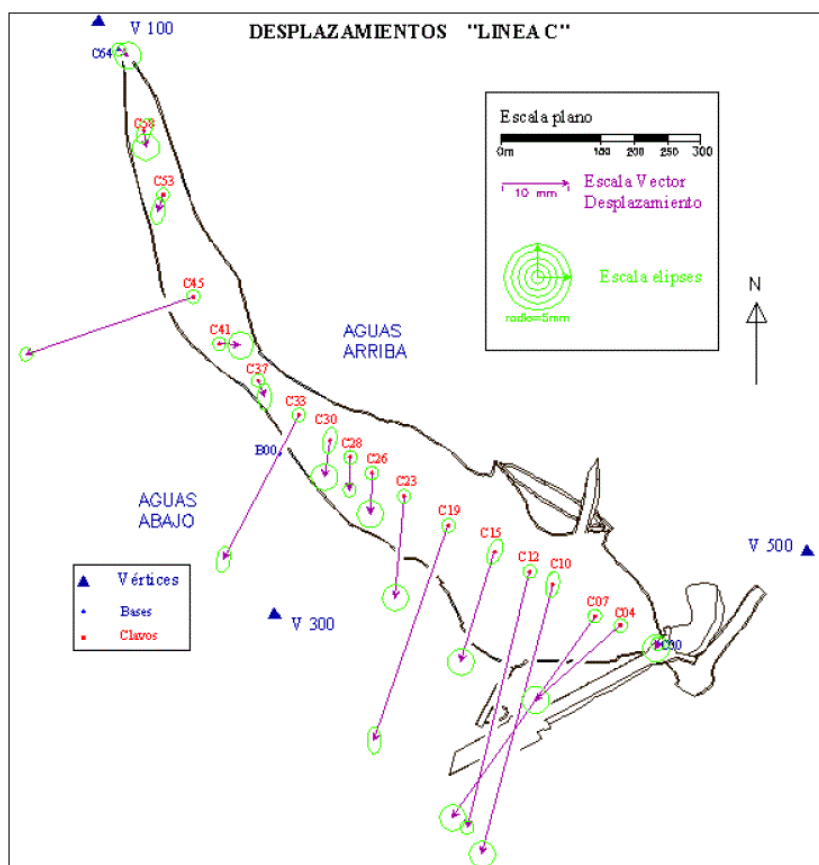


Figura 21.- Resultados planimétricos de la línea C en la campaña 2008

### 3.2.3.- Campañas de 2013

Durante el año 2013 se llevaron a cabo dos nuevas campañas con algunos cambios significativos que se indicarán a continuación.

Estas campañas se han realizado dentro de la Acción Complementaria de referencia CGL2011-15441-E (subprograma BTE), cuyo título es “Control de Deformaciones y Riesgos Naturales en la Ingeniería Civil. Aplicación a la Presa de El Arenoso (Córdoba)”. Se trata de un trabajo que se encuadra en el proyecto Topo-Iberia como una aplicación de las técnicas geodésicas de control de deformaciones a la ingeniería civil.

La adquisición de los datos de nivelación y GPS se realizó durante el mes de abril para la primera campaña y en el mes de julio para la segunda.

#### 3.2.3.1.- Nivelación

Respecto a la nivelación no hay nada que aportar en cuanto a la adquisición de los datos, las campañas se realizaron conforme a lo establecido para las campañas del 2008: equipo, líneas observadas y puntos incluidos en éstas últimas.

Sin embargo, los resultados sí muestran diferencias importantes y se observa la deceleración esperada en el asentamiento de la estructura, 6 años después de su construcción. Los desplazamientos verticales han pasado de un máximo de 75mm en 2008 a los 4.5mm en esta ocasión (AVILÉS, y otros, 2013).

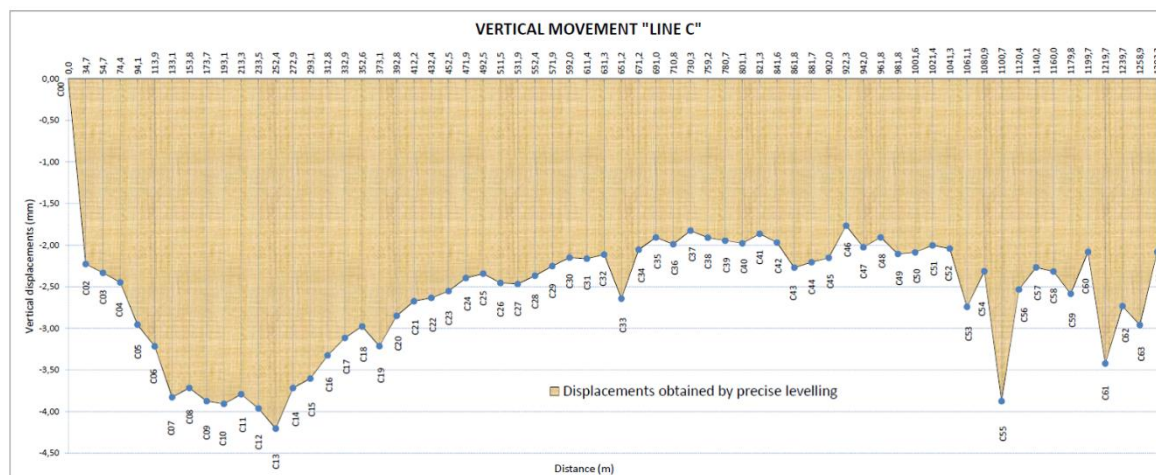


Figura 22.- Desplazamientos verticales entre las campañas de 2013.

### 3.2.3.2.- GPS

Por el contrario, las campañas GPS sufrieron cambios importantes en la planificación, cantidad de puntos a observar, modelo de receptores y antenas y número de equipos.

Los receptores empleados son los modelos Leica GR10, receptores GNSS (ya no sólo GPS) especialmente diseñados para estaciones de referencia. Aunque es posible recibir observaciones GLONASS, no se registran puesto que no serán utilizadas.

Las antenas son del modelo Leica AR10 GNSS, de tipo geodésico con la protección radome integrada.

Los equipos utilizados (receptor + antena) fueron 13, de los cuales 3 permanecieron fijos en los vértices y los 10 restantes se desplazaron por los puntos a controlar.

Las sesiones fueron 8 frente a las 5 de las campañas de 2008. La duración de las mismas también varía, pasando de las 3 modalidades de 2008 a una única de 24 horas. Puede verse las sesiones, equipos empleados y puntos a controlar en la tabla de planificación presentada a continuación.

Los resultados y conclusiones de estas campañas GPS se han realizado en el marco de este trabajo fin de grado, por tanto, se ampliará la información relativa a estas campañas con posterioridad dentro del capítulo siguiente.

| DAY | SESSION | R01/A01 | R02/A02 | R03/A03 | R04/A04 | R05/A05 | R06/A06 | R07/A07 | R08/A08 | R09/A09 | R10/A10 | REFERENCE STATIONS |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------------|
| 1   | 1       | A02     | A05     | A10     | B00     | B07     | B15     | B17     | B22     | B27     | B30     | V100, V300, V500   |
| 2   | 2       | C00     | C07     | C13     | C19     | C25     | C31     | C37     | C43     | C49     | C64     | V100, V300, V500   |
| 3   | 3       | C02     | C08     | C14     | C20     | C26     | C32     | C38     | C44     | C50     | C60     | V100, V300, V500   |
| 4   | 4       | C03     | C09     | C15     | C21     | C27     | C33     | C39     | C45     | C51     | C58     | V100, V300, V500   |
| 5   | 5       | C04     | C10     | C16     | C22     | C28     | C34     | C40     | C46     | C52     | C143    | V100, V300, V500   |
| 6   | 6       | C05     | C11     | C17     | C23     | C29     | C35     | C41     | C47     | C53     | C148    | V100, V300, V500   |
| 7   | 7       | C06     | C12     | C18     | C24     | C30     | C36     | C42     | C48     | C55     | C158    | V100, V300, V500   |
| 8   | 8       | C103    | C108    | C113    | C118    | C123    | C128    | C133    | C138    | C153    | C163    | V100, V300, V500   |

*Figura 23.- Planificación campañas GPS 2013 (AVILÉS, y otros, 2013)*



## 4.- Desarrollo del Trabajo

En este capítulo se describirá todo el proceso de obtención y procesado de datos, nivelación y GPS, desde la planificación de las campañas, pasando por la depuración de datos y concluyendo con el procesado y obtención de resultados.

El presente trabajo incluye 2 campañas completas de campo, tanto de nivelación como de GPS. Ambas se han realizado procediendo con la misma estrategia planificada para las campañas de 2013.

A modo de resumen y aunque luego se volverá a referir esta información, los datos procesados en este trabajo son los siguientes:

- Nivelación: los datos procesados son los obtenidos en campo por el propio alumno durante las campañas 2014 y 2015.
- GPS: en este caso, los datos elaborados corresponden a las campañas 2008 y 2013.

Antes de entrar detalladamente en los trabajos correspondientes a cada una de las campañas citadas, se presenta el marco en el que se desarrolló cada una de las mismas.

La campaña realizada en 2014 se llevó a cabo con objeto de obtener datos de campo tanto para el presente trabajo fin de grado, como para el trabajo fin de grado del compañero Óscar Franco, autor del proyecto de las campañas de 2008.

Mientras que la campaña desarrollada en 2015 forma parte del proyecto *“Análisis Geodésico y Geológico de Deformaciones y Procesos de Acomodación en la Presa del Arenoso (Córdoba)”*.

### 4.1.- Nivelación

Las fechas de las nivelaciones realizadas dentro de este trabajo se llevaron a cabo a finales de agosto de 2014 y a finales de septiembre de 2015.

Al igual que en las 2 campañas de 2008 y en las 2 de 2013, para este trabajo se ha realizado la nivelación de precisión de las 4 líneas independientes de la presa en 2014 y 2015, a saber:

- Línea A: correspondiente a la berma inferior del talud de aguas abajo.
- Línea B: situada en la berma superior del talud de aguas abajo.
- Línea C: discurre por la coronación de la presa junto a su borde de aguas abajo.
- Línea CI: está situada en la coronación en el borde aguas arriba.

El instrumento empleado para la nivelación es un Leica DNA3, con un error marcado por el fabricante en 0.3mm/km en doble nivelación, es decir, realizando ida y vuelta. Para alcanzar los estándares de una nivelación de precisión, las observaciones se han realizado con el siguiente material y cumpliendo los siguientes requisitos:

- Las miras son invar de 3m de código de barras y dos jalones incorporados para su estabilización durante las observaciones.
- El trípode es de madera de patas fijas.
- Los tramos irán de clavo a clavo, realizando al menos dos niveladas entre ellos. De esta forma como norma general, cada nivelada es de aproximadamente 10m, es decir, 5m a espalda y 5m hacia el frente. Para fijar correctamente la mira del punto intermedio, se ha usado una base para mira (sapo).
- La diferencia entre la distancia de observación a espalda y la de frente se ha mantenido en 2cm. De manera que las niveladas se efectúan siempre por el método del punto medio.
- Las observaciones se realizan con un mínimo de 5 repeticiones, se aplica un filtro de desviación típica máxima que, en caso de no cumplir, se rechaza la observación. El valor asignado a la desviación típica máxima es de 0.03mm. Este test lo realiza el nivel tras su configuración.
- Cada nivelada se observa siguiendo el patrón EFFE, es decir, espalda – frente – frente – espalda. Con ello se realiza dos observaciones hacia cada lado. A cada pareja de observaciones (EE / FF) se les aplica otro test, en este caso asociado a una diferencia máxima permitida entre observaciones iguales. El nivel se configura para que rechace la nivelada en caso de encontrar una diferencia superior a 0.03mm entre alguna de las parejas señaladas.
- Las líneas se nivelan de ida y vuelta para verificar el cierre de las mismas. La tolerancia del cierre queda fijada mediante la ecuación [3] presentada en la nivelación de 2008.
- En campo se verifica durante la realización de la vuelta si se cumple el tramo a tramo la tolerancia marcada por la ecuación [3].

- El nivel se configura para que no acepte observaciones realizadas en los extremos de las miras, concretamente se descartan las observaciones situadas a menos de 40cm de alguno de sus extremos. Con ello se evita las observaciones muy próximas al terreno.

Además de todos estos condicionantes, se configura un valor para el error de colimación del aparato antes de comenzar la campaña. Para obtenerlo se utiliza el método Förstner, implementado en el nivel. Una explicación clara y sencilla del método puede verse en el manual del nivel digital o en (GALEN, 2009). Ésta última es muy didáctica.

La organización de los datos consiste en separar cada línea en un fichero o, si la línea requiere más de una jornada de observación, realizar un fichero por jornada y línea. Ambas situaciones se emplearon en las campañas. Señalar que dentro de cada fichero se generaba una “línea” para cada tramo (clavo a clavo). De esta forma, en caso de no cumplir algún tramo la exigente tolerancia, se repetía el tramo con un nombre diferente de “línea”. Posteriormente en el software se descartaba la errónea y no se procesaba.

Una vez completadas las nivelaciones en campo, se ha empleado el programa Leica Geo Office v7.0.1 para el procesado de los datos (ver la figura de ejemplo).

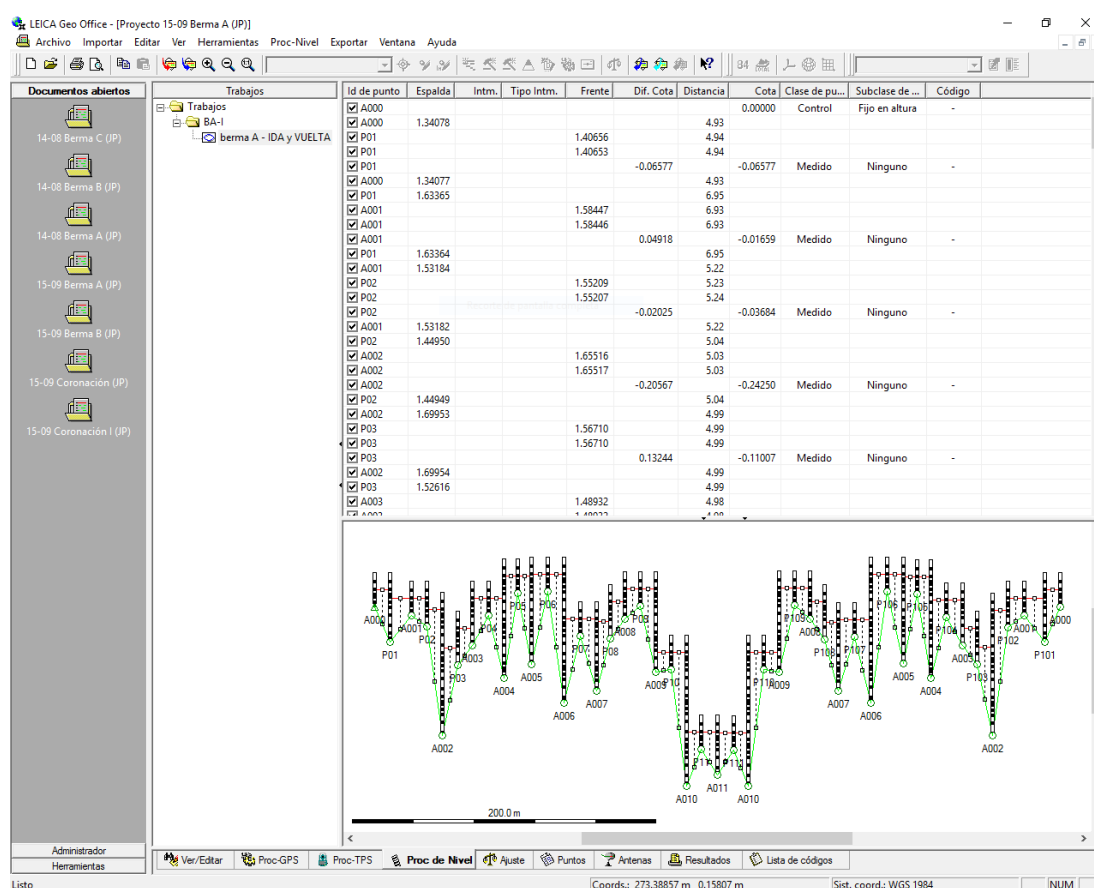


Figura 24.- Ejemplo de línea procesada con Leica Geo Office

Dicho programa es el propio de la marca del nivel, con lo que soporta los datos directamente en el formato nativo del mismo. Lo cual implica el mantenimiento de toda la información que recopila el instrumento durante la campaña. Cuenta con herramientas de edición de nombres y concatenación de “líneas” del nivel para confeccionar las líneas observadas.

A continuación, las siguientes tablas muestran los datos extraídos del Leica Geo Office, con la media de la ida y la vuelta, así como el cierre de cada tramo con su tolerancia obtenida por la ecuación [3]. La última columna muestra si el tramo ha pasado el test.

|     |     | IDA<br>(m) | VUELTA<br>(m) | MEDIA<br>(m) | DISTANCIA<br>(m) | CIERRE<br>(mm) | TOLERANCIA<br>(mm) | S/N |
|-----|-----|------------|---------------|--------------|------------------|----------------|--------------------|-----|
| A00 | A01 | -0.01662   | 0.01660       | -0.01661     | 23.84            | -0.02          | 0.09               | S   |
| A01 | A02 | -0.22563   | 0.22566       | -0.22565     | 20.55            | 0.03           | 0.09               | S   |
| A02 | A03 | 0.16954    | -0.16952      | 0.16953      | 19.96            | 0.02           | 0.08               | S   |
| A03 | A04 | -0.05988   | 0.05984       | -0.05986     | 20.82            | -0.04          | 0.09               | S   |
| A04 | A05 | 0.02734    | -0.02740      | 0.02737      | 18.24            | -0.06          | 0.08               | S   |
| A05 | A06 | -0.07405   | 0.07402       | -0.07404     | 21.22            | -0.03          | 0.09               | S   |
| A06 | A07 | 0.02380    | -0.02379      | 0.02380      | 21.53            | 0.01           | 0.09               | S   |
| A07 | A08 | 0.13455    | -0.13458      | 0.13457      | 18.74            | -0.03          | 0.08               | S   |
| A08 | A09 | -0.10056   | 0.10051       | -0.10054     | 19.99            | -0.05          | 0.08               | S   |
| A09 | A10 | -0.21406   | 0.21409       | -0.21408     | 20.46            | 0.03           | 0.09               | S   |
| A10 | A11 | 0.02014    | -0.02014      | 0.02014      | 20.35            | 0.00           | 0.09               | S   |

Tabla 2.- Campaña 2014 – Desniveles y tolerancia por tramos Línea A

|     |     | IDA<br>(m) | VUELTA<br>(m) | MEDIA<br>(m) | DISTANCIA<br>(m) | CIERRE<br>(mm) | TOLERANCIA<br>(mm) | S/N |
|-----|-----|------------|---------------|--------------|------------------|----------------|--------------------|-----|
| B00 | B02 | -0.04252   | 0.04252       | -0.04252     | 36.16            | 0.00           | 0.11               | S   |
| B02 | B03 | -0.21088   | 0.21086       | -0.21087     | 20.08            | -0.02          | 0.09               | S   |
| B03 | B04 | -0.12156   | 0.12155       | -0.12156     | 20.60            | -0.01          | 0.09               | S   |
| B04 | B05 | 0.12078    | -0.12075      | 0.12077      | 19.96            | 0.03           | 0.08               | S   |
| B05 | B06 | 0.08363    | -0.08361      | 0.08362      | 20.25            | 0.02           | 0.09               | S   |
| B06 | B07 | 0.21647    | -0.21648      | 0.21648      | 20.93            | -0.01          | 0.09               | S   |
| B07 | B08 | 0.13988    | -0.13990      | 0.13989      | 21.10            | -0.02          | 0.09               | S   |
| B08 | B09 | -0.07677   | 0.07678       | -0.07678     | 20.96            | 0.01           | 0.09               | S   |
| B09 | B10 | -0.06704   | 0.06702       | -0.06703     | 21.59            | -0.02          | 0.09               | S   |
| B10 | B11 | 0.03687    | -0.03689      | 0.03688      | 21.39            | -0.02          | 0.09               | S   |
| B11 | B12 | -0.13570   | 0.13574       | -0.13572     | 21.83            | 0.04           | 0.09               | S   |
| B12 | B13 | -0.09342   | 0.09345       | -0.09344     | 21.55            | 0.03           | 0.09               | S   |
| B13 | B14 | 0.17341    | -0.17344      | 0.17343      | 21.10            | -0.03          | 0.09               | S   |
| B14 | B15 | 0.13909    | -0.13908      | 0.13909      | 21.30            | 0.01           | 0.09               | S   |
| B15 | B16 | -0.22280   | 0.22281       | -0.22281     | 19.10            | 0.01           | 0.08               | S   |
| B16 | B17 | 0.02552    | -0.02553      | 0.02553      | 20.95            | -0.01          | 0.09               | S   |
| B17 | B18 | -0.05741   | 0.05738       | -0.05740     | 20.13            | -0.03          | 0.09               | S   |
| B18 | B19 | -0.40395   | 0.40395       | -0.40395     | 20.06            | 0.00           | 0.08               | S   |
| B19 | B20 | 0.00578    | -0.00578      | 0.00578      | 20.54            | 0.00           | 0.09               | S   |
| B20 | B21 | -0.04327   | 0.04331       | -0.04329     | 20.79            | 0.04           | 0.09               | S   |
| B21 | B22 | 0.25277    | -0.25282      | 0.25280      | 21.87            | -0.05          | 0.09               | S   |
| B22 | B23 | -0.11717   | 0.11716       | -0.11717     | 18.18            | -0.01          | 0.08               | S   |
| B23 | B24 | 0.03036    | -0.03032      | 0.03034      | 21.34            | 0.04           | 0.09               | S   |
| B24 | B25 | 0.16624    | -0.16626      | 0.16625      | 18.83            | -0.02          | 0.08               | S   |
| B25 | B26 | 0.16761    | -0.16763      | 0.16762      | 20.26            | -0.02          | 0.09               | S   |
| B26 | B27 | -0.22126   | 0.22130       | -0.22128     | 22.45            | 0.04           | 0.09               | S   |
| B27 | B28 | 0.05819    | -0.05815      | 0.05817      | 19.22            | 0.04           | 0.08               | S   |
| B28 | B29 | 0.20788    | -0.20788      | 0.20788      | 20.04            | 0.00           | 0.08               | S   |
| B29 | B30 | 0.06991    | -0.06991      | 0.06991      | 19.23            | 0.00           | 0.08               | S   |
| B30 | B32 | 0.73252    | -0.73251      | 0.73252      | 36.96            | 0.01           | 0.12               | S   |

Tabla 3.- Campaña 2014 – Desniveles y tolerancia por tramos Línea B

|     |     | IDA<br>(m) | VUELTA<br>(m) | MEDIA<br>(m) | DISTANCIA<br>(m) | CIERRE<br>(mm) | TOLERANCIA<br>(mm) | S/N |
|-----|-----|------------|---------------|--------------|------------------|----------------|--------------------|-----|
| C00 | C02 | 0.25355    | -0.25357      | 0.25356      | 29.78            | -0.02          | 0.10               | S   |
| C02 | C03 | 0.16112    | -0.16112      | 0.16112      | 19.85            | 0.00           | 0.08               | S   |
| C03 | C04 | 0.07447    | -0.07451      | 0.07449      | 19.68            | -0.04          | 0.08               | S   |
| C04 | C05 | 0.07459    | -0.07463      | 0.07461      | 19.62            | -0.04          | 0.08               | S   |
| C05 | C06 | 0.05136    | -0.05136      | 0.05136      | 19.67            | 0.00           | 0.08               | S   |
| C06 | C07 | -0.28845   | 0.28842       | -0.28844     | 19.22            | -0.03          | 0.08               | S   |
| C07 | C08 | 0.21495    | -0.21495      | 0.21495      | 20.72            | 0.00           | 0.09               | S   |
| C08 | C09 | -0.04659   | 0.04661       | -0.04660     | 19.72            | 0.02           | 0.08               | S   |
| C09 | C10 | -0.32907   | 0.32909       | -0.32908     | 19.39            | 0.02           | 0.08               | S   |
| C10 | C11 | 0.39522    | -0.39519      | 0.39521      | 20.08            | 0.03           | 0.09               | S   |
| C11 | C12 | -0.30792   | 0.30790       | -0.30791     | 20.21            | -0.02          | 0.09               | S   |
| C12 | C13 | 0.19265    | -0.19266      | 0.19266      | 18.75            | -0.01          | 0.08               | S   |
| C13 | C14 | 0.06656    | -0.06651      | 0.06654      | 20.46            | 0.05           | 0.09               | S   |
| C14 | C15 | 0.00433    | -0.00433      | 0.00433      | 20.01            | 0.00           | 0.08               | S   |
| C15 | C16 | 0.09753    | -0.09749      | 0.09751      | 19.59            | 0.04           | 0.08               | S   |
| C16 | C17 | 0.02121    | -0.02121      | 0.02121      | 20.02            | 0.00           | 0.08               | S   |
| C17 | C18 | -0.00300   | 0.00304       | -0.00302     | 19.51            | 0.04           | 0.08               | S   |
| C18 | C19 | -0.44388   | 0.44388       | -0.44388     | 20.55            | 0.00           | 0.09               | S   |
| C19 | C20 | 0.53157    | -0.53156      | 0.53157      | 19.61            | 0.01           | 0.08               | S   |
| C20 | C21 | 0.00782    | -0.00780      | 0.00781      | 19.33            | 0.02           | 0.08               | S   |
| C21 | C22 | 0.02649    | -0.02649      | 0.02649      | 20.08            | 0.00           | 0.09               | S   |
| C22 | C23 | -0.31428   | 0.31426       | -0.31427     | 20.17            | -0.02          | 0.09               | S   |
| C23 | C24 | 0.32527    | -0.32525      | 0.32526      | 19.36            | 0.02           | 0.08               | S   |
| C24 | C25 | 0.02983    | -0.02984      | 0.02984      | 20.57            | -0.01          | 0.09               | S   |
| C25 | C26 | -0.07882   | 0.07885       | -0.07884     | 18.95            | 0.03           | 0.08               | S   |
| C26 | C27 | -0.00556   | 0.00557       | -0.00557     | 20.36            | 0.01           | 0.09               | S   |
| C27 | C28 | 0.05291    | -0.05294      | 0.05293      | 20.48            | -0.03          | 0.09               | S   |
| C28 | C29 | -0.00277   | 0.00275       | -0.00276     | 19.49            | -0.02          | 0.08               | S   |
| C29 | C30 | -0.00866   | 0.00867       | -0.00867     | 20.00            | 0.01           | 0.08               | S   |
| C30 | C31 | -0.00215   | 0.00219       | -0.00217     | 19.41            | 0.04           | 0.08               | S   |
| C31 | C32 | 0.03963    | -0.03963      | 0.03963      | 19.85            | 0.00           | 0.08               | S   |
| C32 | C33 | -0.37182   | 0.37179       | -0.37181     | 19.86            | -0.03          | 0.08               | S   |
| C33 | C34 | 0.41977    | -0.41975      | 0.41976      | 19.97            | 0.02           | 0.08               | S   |
| C34 | C35 | -0.06866   | 0.06868       | -0.06867     | 19.82            | 0.02           | 0.08               | S   |
| C35 | C36 | 0.04079    | -0.04076      | 0.04078      | 19.87            | 0.03           | 0.08               | S   |
| C36 | C37 | -0.03717   | 0.03717       | -0.03717     | 19.36            | 0.00           | 0.08               | S   |
| C37 | C38 | -0.37700   | 0.37696       | -0.37698     | 21.43            | -0.04          | 0.09               | S   |
| C38 | C39 | 0.40533    | -0.40538      | 0.40536      | 21.37            | -0.05          | 0.09               | S   |
| C39 | C40 | 0.06066    | -0.06068      | 0.06067      | 20.40            | -0.02          | 0.09               | S   |
| C40 | C41 | -0.04887   | 0.04884       | -0.04886     | 20.08            | -0.03          | 0.09               | S   |
| C41 | C42 | -0.02405   | 0.02408       | -0.02407     | 20.40            | 0.03           | 0.09               | S   |
| C42 | C43 | -0.00010   | 0.00007       | -0.00008     | 20.14            | -0.03          | 0.09               | S   |
| C43 | C44 | -0.04256   | 0.04256       | -0.04256     | 19.87            | 0.00           | 0.08               | S   |
| C44 | C45 | -0.26215   | 0.26213       | -0.26214     | 20.28            | -0.02          | 0.09               | S   |
| C45 | C46 | 0.29708    | -0.29707      | 0.29708      | 20.32            | 0.01           | 0.09               | S   |
| C46 | C47 | -0.05555   | 0.05557       | -0.05556     | 19.66            | 0.02           | 0.08               | S   |
| C47 | C48 | 0.09063    | -0.09063      | 0.09063      | 19.78            | 0.00           | 0.08               | S   |
| C48 | C49 | 0.00071    | -0.00069      | 0.00070      | 20.00            | 0.02           | 0.08               | S   |
| C49 | C50 | -0.00036   | 0.00033       | -0.00034     | 19.74            | -0.03          | 0.08               | S   |
| C50 | C51 | 0.14956    | -0.14956      | 0.14956      | 19.74            | 0.00           | 0.08               | S   |
| C51 | C52 | -0.14796   | 0.14795       | -0.14796     | 19.91            | -0.01          | 0.08               | S   |
| C52 | C53 | -0.04815   | 0.04818       | -0.04817     | 19.82            | 0.03           | 0.08               | S   |
| C53 | C54 | 0.05899    | -0.05899      | 0.05899      | 19.71            | 0.00           | 0.08               | S   |
| C54 | C55 | -0.05310   | 0.05313       | -0.05312     | 19.72            | 0.03           | 0.08               | S   |
| C55 | C56 | -0.01747   | 0.01749       | -0.01748     | 19.68            | 0.02           | 0.08               | S   |
| C56 | C57 | -0.01684   | 0.01683       | -0.01684     | 19.71            | -0.01          | 0.08               | S   |
| C57 | C58 | 0.03344    | -0.03346      | 0.03345      | 19.82            | -0.02          | 0.08               | S   |
| C58 | C59 | -0.13370   | 0.13365       | -0.13368     | 19.76            | -0.05          | 0.08               | S   |
| C59 | C60 | -0.11730   | 0.11730       | -0.11730     | 19.87            | 0.00           | 0.08               | S   |
| C60 | C61 | -0.13786   | 0.13786       | -0.13786     | 19.88            | 0.00           | 0.08               | S   |
| C61 | C62 | 0.00521    | -0.00524      | 0.00522      | 19.96            | -0.03          | 0.08               | S   |
| C62 | C63 | 0.10290    | -0.10288      | 0.10289      | 19.07            | 0.02           | 0.08               | S   |
| C63 | C64 | 0.58236    | -0.58236      | 0.58236      | 19.80            | 0.00           | 0.08               | S   |

Tabla 4.- Campaña 2014 – Desniveles y tolerancia por tramos Línea C

|     |      | IDA<br>(m) | VUELTA<br>(m) | MEDIA<br>(m) | DISTANCIA<br>(m) | CIERRE<br>(mm) | TOLERANCIA<br>(mm) | S/N |
|-----|------|------------|---------------|--------------|------------------|----------------|--------------------|-----|
| C03 | CI03 | -0.22326   | 0.22327       | -0.22327     | 4.48             | 0.01           | 0.04               | S   |
| C08 | CI08 | -0.08315   | 0.08315       | -0.08315     | 4.16             | 0.00           | 0.04               | S   |
| C13 | CI13 | -0.21246   | 0.21247       | -0.21247     | 4.12             | 0.01           | 0.04               | S   |
| C18 | CI18 | -0.24408   | 0.24409       | -0.24409     | 4.16             | 0.01           | 0.04               | S   |
| C23 | CI23 | 0.16037    | -0.16040      | 0.16039      | 4.03             | -0.03          | 0.04               | S   |
| C28 | CI28 | -0.13476   | 0.13476       | -0.13476     | 4.06             | 0.00           | 0.04               | S   |
| C33 | CI33 | 0.02598    | -0.02596      | 0.02597      | 4.12             | 0.02           | 0.04               | S   |
| C38 | CI38 | 0.42885    | -0.42884      | 0.42885      | 7.45             | 0.01           | 0.05               | S   |
| C43 | CI43 | -0.15988   | 0.15987       | -0.15988     | 4.10             | -0.01          | 0.04               | S   |
| C48 | CI48 | -0.14129   | 0.14132       | -0.14131     | 4.10             | 0.03           | 0.04               | S   |
| C53 | CI53 | 0.00697    | -0.00696      | 0.00697      | 3.98             | 0.01           | 0.04               | S   |
| C58 | CI58 | -0.13727   | 0.13728       | -0.13728     | 4.18             | 0.01           | 0.04               | S   |
| C63 | CI63 | -0.32498   | 0.32498       | -0.32498     | 4.96             | 0.00           | 0.04               | S   |

Tabla 5.- Campaña 2014 – Desniveles y tolerancia por tramos Línea CI

|     |     | IDA<br>(m) | VUELTA<br>(m) | MEDIA<br>(m) | DISTANCIA<br>(m) | CIERRE<br>(mm) | TOLERANCIA<br>(mm) | S/N |
|-----|-----|------------|---------------|--------------|------------------|----------------|--------------------|-----|
| A00 | A01 | -0.01659   | 0.01654       | -0.01657     | 23.72            | -0.05          | 0.09               | S   |
| A01 | A02 | -0.22592   | 0.22589       | -0.22591     | 20.53            | -0.03          | 0.09               | S   |
| A02 | A03 | 0.16929    | -0.16934      | 0.16932      | 19.95            | -0.05          | 0.08               | S   |
| A03 | A04 | -0.06106   | 0.06106       | -0.06106     | 20.79            | 0.00           | 0.09               | S   |
| A04 | A05 | 0.02706    | -0.02703      | 0.02705      | 18.26            | 0.03           | 0.08               | S   |
| A05 | A06 | -0.07405   | 0.07407       | -0.07406     | 21.22            | 0.02           | 0.09               | S   |
| A06 | A07 | 0.02326    | -0.02325      | 0.02326      | 21.50            | 0.01           | 0.09               | S   |
| A07 | A08 | 0.13499    | -0.13494      | 0.13497      | 18.75            | 0.05           | 0.08               | S   |
| A08 | A09 | -0.09973   | 0.09981       | -0.09977     | 19.96            | 0.08           | 0.08               | S   |
| A09 | A10 | -0.21370   | 0.21371       | -0.21371     | 20.44            | 0.01           | 0.09               | S   |
| A10 | A11 | 0.02057    | -0.02054      | 0.02056      | 20.32            | 0.03           | 0.09               | S   |

Tabla 6.- Campaña 2015 – Desniveles y tolerancia por tramos Línea A

|     |     | IDA<br>(m) | VUELTA<br>(m) | MEDIA<br>(m) | DISTANCIA<br>(m) | CIERRE<br>(mm) | TOLERANCIA<br>(mm) | S/N |
|-----|-----|------------|---------------|--------------|------------------|----------------|--------------------|-----|
| B00 | B02 | -0.04221   | 0.04219       | -0.04220     | 36.09            | -0.02          | 0.11               | S   |
| B02 | B03 | -0.21103   | 0.21101       | -0.21102     | 20.08            | -0.02          | 0.09               | S   |
| B03 | B04 | -0.12155   | 0.12161       | -0.12158     | 20.61            | 0.06           | 0.09               | S   |
| B04 | B05 | 0.12064    | -0.12068      | 0.12066      | 19.95            | -0.04          | 0.08               | S   |
| B05 | B06 | 0.08370    | -0.08373      | 0.08372      | 20.26            | -0.03          | 0.09               | S   |
| B06 | B07 | 0.21649    | -0.21648      | 0.21649      | 20.98            | 0.01           | 0.09               | S   |
| B07 | B08 | 0.13997    | -0.14002      | 0.14000      | 21.10            | -0.05          | 0.09               | S   |
| B08 | B09 | -0.07675   | 0.07670       | -0.07673     | 20.99            | -0.05          | 0.09               | S   |
| B09 | B10 | -0.06713   | 0.06720       | -0.06717     | 21.64            | 0.07           | 0.09               | S   |
| B10 | B11 | 0.03674    | -0.03679      | 0.03677      | 21.43            | -0.05          | 0.09               | S   |
| B11 | B12 | -0.13586   | 0.13585       | -0.13586     | 21.37            | -0.01          | 0.09               | S   |
| B12 | B13 | -0.09372   | 0.09378       | -0.09375     | 21.56            | 0.06           | 0.09               | S   |
| B13 | B14 | 0.17337    | -0.17336      | 0.17337      | 21.07            | 0.01           | 0.09               | S   |
| B14 | B15 | 0.13877    | -0.13874      | 0.13876      | 21.29            | 0.03           | 0.09               | S   |
| B15 | B16 | -0.22275   | 0.22279       | -0.22277     | 19.07            | 0.04           | 0.08               | S   |
| B16 | B17 | 0.02532    | -0.02528      | 0.02530      | 21.13            | 0.04           | 0.09               | S   |
| B17 | B18 | -0.05777   | 0.05777       | -0.05777     | 20.12            | 0.00           | 0.09               | S   |
| B18 | B19 | -0.40459   | 0.40454       | -0.40457     | 20.04            | -0.05          | 0.08               | S   |
| B19 | B20 | 0.00514    | -0.00516      | 0.00515      | 20.55            | -0.02          | 0.09               | S   |
| B20 | B21 | -0.04369   | 0.04377       | -0.04373     | 20.78            | 0.08           | 0.09               | S   |
| B21 | B22 | 0.25240    | -0.25240      | 0.25240      | 21.88            | 0.00           | 0.09               | S   |
| B22 | B23 | -0.11687   | 0.11681       | -0.11684     | 18.25            | -0.06          | 0.08               | S   |
| B23 | B24 | 0.03044    | -0.03043      | 0.03044      | 21.34            | 0.01           | 0.09               | S   |
| B24 | B25 | 0.16648    | -0.16646      | 0.16647      | 18.86            | 0.02           | 0.08               | S   |
| B25 | B26 | 0.16828    | -0.16830      | 0.16829      | 20.23            | -0.02          | 0.09               | S   |
| B26 | B27 | -0.22116   | 0.22122       | -0.22119     | 22.20            | 0.06           | 0.09               | S   |
| B27 | B28 | 0.05875    | -0.05875      | 0.05875      | 19.20            | 0.00           | 0.08               | S   |
| B28 | B29 | 0.20798    | -0.20795      | 0.20797      | 20.02            | 0.03           | 0.08               | S   |
| B29 | B30 | 0.07026    | -0.07030      | 0.07028      | 19.19            | -0.04          | 0.08               | S   |
| B30 | B32 | 0.73320    | -0.73316      | 0.73318      | 36.66            | 0.04           | 0.11               | S   |

Tabla 7.- Campaña 2015 – Desniveles y tolerancia por tramos Línea B

|     |     | IDA<br>(m) | VUELTA<br>(m) | MEDIA<br>(m) | DISTANCIA<br>(m) | CIERRE<br>(mm) | TOLERANCIA<br>(mm) | S/N |
|-----|-----|------------|---------------|--------------|------------------|----------------|--------------------|-----|
| C00 | C02 | 0.25399    | -0.25405      | 0.25402      | 28.52            | -0.06          | 0.10               | S   |
| C02 | C03 | 0.16055    | -0.16056      | 0.16056      | 19.84            | -0.01          | 0.08               | S   |
| C03 | C04 | 0.07326    | -0.07328      | 0.07327      | 19.68            | -0.02          | 0.08               | S   |
| C04 | C05 | 0.07370    | -0.07370      | 0.07370      | 19.65            | 0.00           | 0.08               | S   |
| C05 | C06 | 0.05025    | -0.05019      | 0.05022      | 19.70            | 0.06           | 0.08               | S   |
| C06 | C07 | -0.28975   | 0.28980       | -0.28978     | 19.17            | 0.05           | 0.08               | S   |
| C07 | C08 | 0.21520    | -0.21521      | 0.21521      | 20.66            | -0.01          | 0.09               | S   |
| C08 | C09 | -0.04739   | 0.04743       | -0.04741     | 19.72            | 0.04           | 0.08               | S   |
| C09 | C10 | -0.32969   | 0.32971       | -0.32970     | 19.44            | 0.02           | 0.08               | S   |
| C10 | C11 | 0.39549    | -0.39548      | 0.39549      | 20.08            | 0.01           | 0.09               | S   |
| C11 | C12 | -0.30856   | 0.30851       | -0.30854     | 20.20            | -0.05          | 0.09               | S   |
| C12 | C13 | 0.19400    | -0.19399      | 0.19400      | 18.75            | 0.01           | 0.08               | S   |
| C13 | C14 | 0.06686    | -0.06687      | 0.06687      | 20.48            | -0.01          | 0.09               | S   |
| C14 | C15 | 0.00481    | -0.00479      | 0.00480      | 20.01            | 0.02           | 0.08               | S   |
| C15 | C16 | 0.09803    | -0.09798      | 0.09801      | 19.61            | 0.05           | 0.08               | S   |
| C16 | C17 | 0.02195    | -0.02197      | 0.02196      | 20.06            | -0.02          | 0.08               | S   |
| C17 | C18 | -0.00258   | 0.00259       | -0.00258     | 19.52            | 0.01           | 0.08               | S   |
| C18 | C19 | -0.44482   | 0.44476       | -0.44479     | 20.60            | -0.06          | 0.09               | S   |
| C19 | C20 | 0.53296    | -0.53298      | 0.53297      | 19.61            | -0.02          | 0.08               | S   |
| C20 | C21 | 0.00817    | -0.00819      | 0.00818      | 19.33            | -0.02          | 0.08               | S   |
| C21 | C22 | 0.02674    | -0.02674      | 0.02674      | 20.08            | 0.00           | 0.09               | S   |
| C22 | C23 | -0.31496   | 0.31504       | -0.31500     | 20.15            | 0.08           | 0.09               | S   |
| C23 | C24 | 0.32621    | -0.32622      | 0.32622      | 19.33            | -0.01          | 0.08               | S   |
| C24 | C25 | 0.02984    | -0.02979      | 0.02982      | 20.56            | 0.05           | 0.09               | S   |
| C25 | C26 | -0.07879   | 0.07881       | -0.07880     | 18.92            | 0.02           | 0.08               | S   |
| C26 | C27 | -0.00572   | 0.00571       | -0.00572     | 20.38            | -0.01          | 0.09               | S   |
| C27 | C28 | 0.05312    | -0.05305      | 0.05309      | 20.50            | 0.07           | 0.09               | S   |
| C28 | C29 | -0.00285   | 0.00292       | -0.00289     | 19.50            | 0.07           | 0.08               | S   |
| C29 | C30 | -0.00836   | 0.00831       | -0.00834     | 20.04            | -0.05          | 0.08               | S   |
| C30 | C31 | -0.00208   | 0.00213       | -0.00211     | 19.43            | 0.05           | 0.08               | S   |
| C31 | C32 | 0.03989    | -0.03995      | 0.03992      | 19.84            | -0.06          | 0.08               | S   |
| C32 | C33 | -0.37272   | 0.37275       | -0.37274     | 19.88            | 0.03           | 0.08               | S   |
| C33 | C34 | 0.42110    | -0.42111      | 0.42111      | 19.94            | -0.01          | 0.08               | S   |
| C34 | C35 | -0.06844   | 0.06844       | -0.06844     | 19.82            | 0.00           | 0.08               | S   |
| C35 | C36 | 0.04086    | -0.04085      | 0.04086      | 19.87            | 0.01           | 0.08               | S   |
| C36 | C37 | -0.03682   | 0.03689       | -0.03686     | 19.36            | 0.07           | 0.08               | S   |
| C37 | C38 | -0.37685   | 0.37685       | -0.37685     | 21.41            | 0.00           | 0.09               | S   |
| C38 | C39 | 0.40473    | -0.40475      | 0.40474      | 21.39            | -0.02          | 0.09               | S   |
| C39 | C40 | 0.06023    | -0.06018      | 0.06021      | 20.38            | 0.05           | 0.09               | S   |
| C40 | C41 | -0.04930   | 0.04936       | -0.04933     | 20.07            | 0.06           | 0.09               | S   |
| C41 | C42 | -0.02418   | 0.02423       | -0.02421     | 20.33            | 0.05           | 0.09               | S   |
| C42 | C43 | -0.00030   | 0.00027       | -0.00029     | 20.16            | -0.03          | 0.09               | S   |
| C43 | C44 | -0.04269   | 0.04270       | -0.04270     | 19.84            | 0.01           | 0.08               | S   |
| C44 | C45 | -0.26290   | 0.26288       | -0.26289     | 20.29            | -0.02          | 0.09               | S   |
| C45 | C46 | 0.29799    | -0.29794      | 0.29797      | 20.32            | 0.05           | 0.09               | S   |
| C46 | C47 | -0.05567   | 0.05572       | -0.05570     | 19.63            | 0.05           | 0.08               | S   |
| C47 | C48 | 0.09079    | -0.09077      | 0.09078      | 19.78            | 0.02           | 0.08               | S   |
| C48 | C49 | 0.00084    | -0.00085      | 0.00084      | 19.97            | -0.01          | 0.08               | S   |
| C49 | C50 | -0.00035   | 0.00030       | -0.00033     | 19.73            | -0.05          | 0.08               | S   |
| C50 | C51 | 0.14961    | -0.14960      | 0.14961      | 19.72            | 0.01           | 0.08               | S   |
| C51 | C52 | -0.14780   | 0.14783       | -0.14782     | 19.91            | 0.03           | 0.08               | S   |
| C52 | C53 | -0.04805   | 0.04805       | -0.04805     | 19.83            | 0.00           | 0.08               | S   |
| C53 | C54 | 0.05873    | -0.05880      | 0.05877      | 19.74            | -0.07          | 0.08               | S   |
| C54 | C55 | -0.05387   | 0.05389       | -0.05388     | 19.68            | 0.02           | 0.08               | S   |
| C55 | C56 | -0.01669   | 0.01670       | -0.01670     | 19.72            | 0.01           | 0.08               | S   |
| C56 | C57 | -0.01659   | 0.01656       | -0.01658     | 19.70            | -0.03          | 0.08               | S   |
| C57 | C58 | 0.03372    | -0.03373      | 0.03373      | 19.82            | -0.01          | 0.08               | S   |
| C58 | C59 | -0.13365   | 0.13366       | -0.13366     | 19.79            | 0.01           | 0.08               | S   |
| C59 | C60 | -0.11689   | 0.11695       | -0.11692     | 19.85            | 0.06           | 0.08               | S   |
| C60 | C61 | -0.13828   | 0.13834       | -0.13831     | 19.87            | 0.06           | 0.08               | S   |
| C61 | C62 | 0.00584    | -0.00578      | 0.00581      | 19.94            | 0.06           | 0.08               | S   |
| C62 | C63 | 0.10389    | -0.10385      | 0.10387      | 19.11            | 0.04           | 0.08               | S   |
| C63 | C64 | 0.58235    | -0.58233      | 0.58234      | 19.80            | 0.02           | 0.08               | S   |

Tabla 8.- Campaña 2015 – Desniveles y tolerancia por tramos Línea C

|     |      | IDA<br>(m) | VUELTA<br>(m) | MEDIA<br>(m) | DISTANCIA<br>(m) | CIERRE<br>(mm) | TOLERANCIA<br>(mm) | S/N |
|-----|------|------------|---------------|--------------|------------------|----------------|--------------------|-----|
| C03 | CI03 | -0.22357   | 0.22351       | -0.22354     | 4.48             | -0.06          | 0.04               | N   |
| C08 | CI08 | -0.08363   | 0.08360       | -0.08362     | 4.16             | -0.03          | 0.04               | S   |
| C13 | CI13 | -0.21246   | 0.21247       | -0.21247     | 4.12             | 0.01           | 0.04               | S   |
| C18 | CI18 | -0.24443   | 0.24439       | -0.24441     | 4.16             | -0.04          | 0.04               | N   |
| C23 | CI23 | 0.16064    | -0.16067      | 0.16066      | 4.03             | -0.03          | 0.04               | S   |
| C28 | CI28 | -0.13518   | 0.13516       | -0.13517     | 4.06             | -0.02          | 0.04               | S   |
| C33 | CI33 | 0.02646    | -0.02644      | 0.02645      | 4.12             | 0.02           | 0.04               | S   |
| C38 | CI38 | 0.42790    | -0.42795      | 0.42793      | 7.45             | -0.05          | 0.05               | S   |
| C43 | CI43 | -0.16106   | 0.16105       | -0.16106     | 4.10             | -0.01          | 0.04               | S   |
| C48 | CI48 | -0.14184   | 0.14179       | -0.14182     | 4.10             | -0.05          | 0.04               | N   |
| C53 | CI53 | 0.00604    | -0.00613      | 0.00609      | 3.98             | -0.09          | 0.04               | N   |
| C58 | CI58 | -0.13750   | 0.13746       | -0.13748     | 4.18             | -0.04          | 0.04               | N   |
| C63 | CI63 | -0.32478   | 0.32477       | -0.32478     | 4.96             | -0.01          | 0.04               | S   |

Tabla 9.- Campaña 2015 – Desniveles y tolerancia por tramos Línea CI

## 4.2.- GPS

La estrategia de procesamiento aplicada en este trabajo ha sido análoga a la empleada por la Universidad de Jaén (UJA) como centro de análisis de la red Topo-Iberia. Antes de entrar en detalle con el procesamiento llevado a cabo en este trabajo, se realizará una breve introducción a Bernese GPS Software versión 5.0, por ser el empleado para estas operaciones y, a continuación, se describirá la estrategia seguida por la UJA en Topo-Iberia.

Seguidamente se pormenorizará los trabajos desarrollados para la elaboración de este estudio.

### 4.2.1.- Software Bernese

Se trata de un programa científico, de alta precisión, para el procesado de datos procedentes de varios sistemas globales de navegación por satélite. Está desarrollado por el Instituto Astronómico de la Universidad de Berna (Suiza) (AIUB, 2016).

Bernese es particularmente adecuado para las siguientes situaciones (DACH, y otros, 2007):

- Procesado rápido de mediciones en simple o doble frecuencia.
- Procesamiento automático de redes permanentes (BPE).
- Procesamiento de datos con un gran número de receptores.
- Combinaciones de diferentes tipos de receptores y antenas.
- Procesamiento combinado de observaciones GPS y GLONASS.

- Resolución de ambigüedades para líneas base largas (más de 2000 km).
- Generación de soluciones de red con mínimos constreñimientos.
- Monitorización troposférica e ionosférica.
- Estimación del desfase del reloj y tiempo de transferencia.
- Determinación de órbitas y estimación de los parámetros de orientación terrestre.

El programa está implementado en Fortran 90 y la interfaz de usuario en C++. Funciona bajo los sistemas operativos UNIX/Linux y MS-Windows, éste último es el usado durante el presente trabajo. Se estructura en diferentes partes que se describen a continuación (DACH, y otros, 2007):

- Transferencia: compuesto por rutinas para la generación de ficheros en formato Bernese a partir de RINEX y viceversa. Permite cortar, concatenar y manipular ficheros RINEX.
- Conversión: se trata de rutinas para la extracción de información externa necesaria para el procesamiento. Por ejemplo, coordenadas y velocidades desde ITRF en formato SINEX.
- Órbitas: son rutinas para generación de una representación orbital independiente de la fuente, actualización de órbitas, generación de órbitas en formato preciso, comparación de órbitas, etc. Aquí se incluye también las herramientas relativas a los parámetros de orientación terrestre.
- Procesado: engloba las rutinas de procesado de código para estaciones simples, preprocesado de simple o doble frecuencia de código y fase, estimación de los parámetros a partir de observaciones GPS y/o GLONASS y la construcción del sistema de ecuaciones normales.
- Simulación: a partir de información estadística genera observaciones simuladas para GPS y GLONASS.
- Servicios: colección de herramientas útiles para la edición, exploración y manipulación de ficheros en formato binario, comparación de coordenadas, presentación de residuos, etc.

Por encima de todas estas herramientas se encuentra Bernese Processing Engine (BPE), es el motor de configuración para la automatización de procesos, por ejemplo, el procesado de datos procedentes de una red permanente.

#### **4.2.2.- Procesamiento UJA de Topo-Iberia**

La estrategia de procesado de la UJA, como veremos a continuación, utiliza unos procedimientos análogos a los descritos anteriormente para la determinación de las diferentes soluciones que, tras su combinación, permiten la generación de las últimas versiones de ITRF. Se está haciendo referencia a las soluciones de

coordenadas y velocidades de las estaciones calculadas por los centros de análisis de las diferentes tecnologías geodésicas.

Como ya se ha señalado en varias ocasiones, la UJA analiza los datos GPS de las estaciones de la red Topo-Iberia con Bernese. Se estima una solución diaria en un marco de referencia débilmente constreñido, próximo a la deficiencia de rango. Dichas soluciones mínimamente constreñidas se llevan a cabo en un marco de referencia intrínseco, es decir, definido por las propias observaciones. Difieren entre sí de un día a otro sólo por traslaciones rígidas de la red, siempre mantiene las distancias entre las estaciones bien definidas (DE LACY, y otros, 2014). Estos resultados se almacenan junto con sus matrices de covarianza en formato SINEX.

¿Pero cómo se ha llegado hasta ahí? A continuación, se mostrará un breve resumen de los principales procedimientos, ficheros de entrada y modelos empleados para ello:

- Emplea las triples diferencias en un preprocesado de los datos línea base a línea base para eliminar los saltos de ciclo (BIAGI, 2009).
- Utiliza las dobles diferencias de fase como observables (combinación lineal libre de ionosfera). El código se usa sólo para la sincronización de los relojes de los receptores mediante la rutina CODSP (DACH, y otros, 2007).
- El intervalo de observación es de 30 segundos.
- Se sirve de las órbitas precisas y los parámetros de orientación terrestres del IGS, considerándolos fijos.
- Practica las correcciones correspondientes a los centros de fase de las antenas mediante el pertinente fichero proporcionado por el IGS, son variables en función de la elevación del satélite.
- Se incluye el modelo de carga oceánica (FES2004), de marea oceánica (OT\_CSRC), de geopotencial (JGM3), se aplica el modelo de mareas terrestres y las efemérides planetarias (DE2000), no se aplica el modelo de carga atmosférica.
- El efecto troposférico se modela mediante el modelo a priori dry-Niell a partir de las correcciones del retardo cenital a intervalos de 2 horas en cada posición usando la función de mapeado wet-Niell.
- La ambigüedad se resuelve para cada línea base mediante la estrategia QIF (Quasi Ionosphere Free) (DACH, y otros, 2007).

Retomando el fichero en formato SINEX generado con las soluciones diarias débilmente constreñidas y sus matrices de covarianzas, se debe señalar que los constreñimientos para la realización del marco de referencia escogido se imponen a posteriori. En este caso a IGB08, es decir, la solución aportada por el IGS (como combinación de las soluciones de sus diferentes centros de análisis) para la realización de ITRF2008. Para llegar ahí se ha utilizado las estaciones fiduciales

siguientes: AJAC, BOR1, BUCU, CAGL, EBRE, GRAS, GRAZ, LAMP, MATE, NOT1, SFER, SJDV y ZIMM. En esta transformación se calculan los parámetros de traslación y escala en una transformación rígida de las soluciones de red diarias.

El siguiente paso consiste en obtener el campo de velocidades, para ello se emplea el software NEVE desarrollado para estos fines por el Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia di Roma (Italia), trabaja con un modelo estocástico completo. El campo de velocidades se calcula a partir de las series temporales (DE LACY, y otros, 2014). Las soluciones diarias se apilan en una matriz de ecuaciones normales y las posiciones y velocidades de cada estación se estima simultáneamente con las componentes anuales y los desplazamientos singulares debidos a cambios de instrumental en épocas concretas. Los parámetros estimados dependen de las matrices de covarianza, por tanto, los errores asociados a las velocidades se derivan directamente de las matrices de covarianza diarias (DEVOTI, y otros, 2008).

De este modo se obtiene no sólo las velocidades absolutas respecto al marco de referencia, sino también las residuales al eliminar el desplazamiento de la placa de Eurasia. En la figura del campo de velocidades se muestran ambas (DE LACY, y otros, 2014).

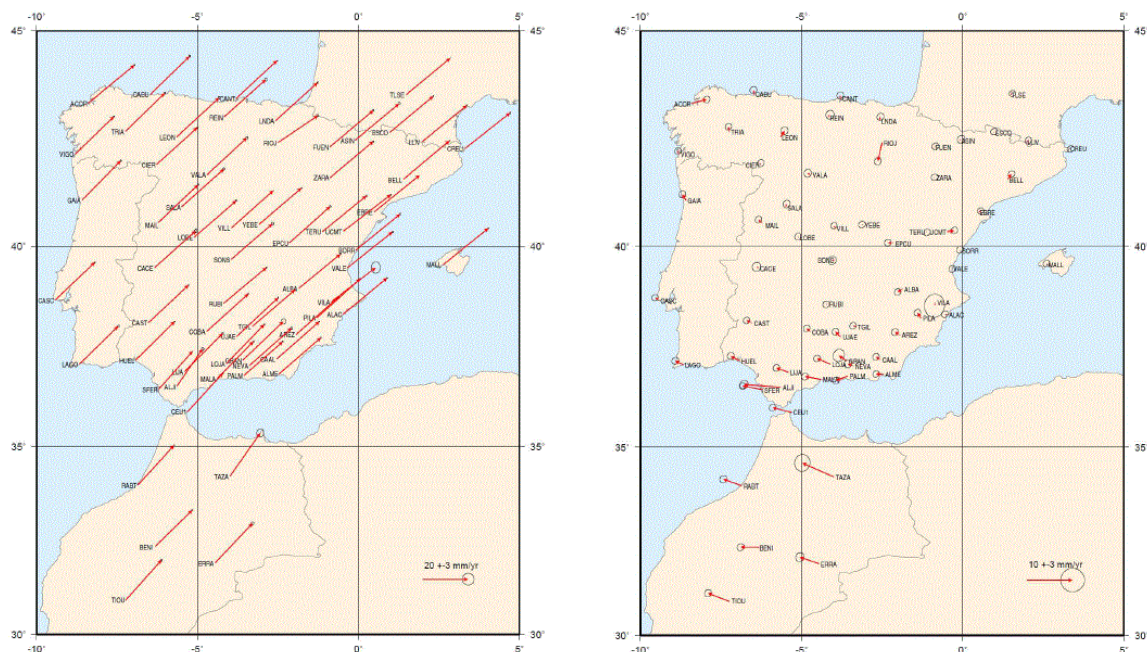


Figura 25.- Campos de velocidades absolutos y relativos Topo-Iberia (UJA)

#### 4.2.3.- Planificación y procesamiento TFG

Las fechas de las campañas GPS realizadas dentro de este trabajo se llevaron a cabo a mediados de septiembre de 2014 y hacia finales de octubre de 2015.

La toma de datos se realizó del mismo modo que durante las campañas de 2013 y con los mismos equipos. La tabla siguiente muestra la posición de los equipos en cada sesión de observación.

| SESIÓN | R01<br>A01 | R02<br>A02 | R03<br>A03 | R04<br>A04 | R05<br>A05 | R06<br>A06 | R07<br>A07 | R08<br>A08 | R09<br>A09 | R10<br>A10 | VÉRTICES         |
|--------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------------|
| 1      | A02        | A05        | A10        | B00        | B07        | B15        | B17        | B22        | B27        | B30        | V100, V300, V500 |
| 2      | C00        | C07        | C13        | C19        | C25        | C31        | C37        | C43        | C49        | C64        | V100, V300, V500 |
| 3      | C02        | C08        | C14        | C20        | C26        | C32        | C38        | C44        | C50        | C60        | V100, V300, V500 |
| 4      | C03        | C09        | C15        | C21        | C27        | C33        | C39        | C45        | C51        | C58        | V100, V300, V500 |
| 5      | C04        | C10        | C16        | C22        | C28        | C34        | C40        | C46        | C52        | CI43       | V100, V300, V500 |
| 6      | C05        | C11        | C17        | C23        | C29        | C35        | C41        | C47        | C53        | CI48       | V100, V300, V500 |
| 7      | C06        | C12        | C18        | C24        | C30        | C36        | C42        | C48        | C55        | CI58       | V100, V300, V500 |
| 8      | CI03       | CI08       | CI13       | CI18       | CI23       | CI28       | CI33       | CI38       | CI53       | CI63       | V100, V300, V500 |

*Figura 26.- Planificación de las campañas GPS de 2014 y 2015*

Los estacionamientos se realizan sobre pilar en los vértices con centrado forzoso y sobre trípode en todos los puntos de control. Es importante asegurarse de la estabilidad del trípode puesto que debe soportar 24 horas sin sufrir ningún movimiento.

Para concluir con la toma de datos, las sesiones comenzaban y finalizaban a las 14:00, es decir, coincidiendo con el mediodía GPS (horario de verano todavía) para obtener de cada punto de control una pareja de ficheros con aproximadamente 12 horas cada uno. Se recuerda que los ficheros en formato RINEX son diarios, por lo que a la medianoche GPS se cierra un fichero y se crea el segundo.

Como ya se comentó anteriormente, la participación en la adquisición de los datos de las campañas 2014 y 2015 es únicamente para conocer firmemente el proceso de adquisición realizado durante 2013. Los datos de estas campañas serán procesados fuera de este trabajo.

El objeto principal de este trabajo es la aplicación de los métodos de control de deformaciones de la corteza a la ingeniería civil para la resolución de los problemas planteados, tras los problemas e incertidumbres generados al procesar las campañas de 2008.

Previamente al procesamiento de los datos GPS, se realiza una serie de operaciones de preparación de la información:

- Generación de ficheros RINEX: se extraen los datos de los diferentes receptores y se generan los ficheros en formato RINEX con la información contenida en los receptores.
- Depuración de RINEX: la información introducida en campo a los ficheros de observación puede contener errores o deficiencias. Para ello se revisa los RINEX uno a uno con el fin de verificar el nombre

de la estación, tipo de receptor y antena y la altura de antena medida en campo. También se observa el tamaño del fichero, un volumen de información anormal mostraría un tamaño fuera de la media.

- Creación de ficheros de estaciones: es un fichero propio de Bernese en el que se incluyen con un formato concreto las estaciones utilizadas, por estaciones se entiende cualquier punto que se pretenda procesar.
- Órbitas precisas: se descargan los ficheros con las órbitas precisas elaborados por el IGS.
- Parámetros de orientación terrestre: igualmente se obtienen del IGS.
- Fichero SINEX del clúster procesado en Italia para Topo-Iberia: se trata de las estaciones usadas en Topo-Iberia para conseguir un conjunto de estaciones fiduciales más estable (DE LACY, y otros, 2014). En este trabajo se han incorporado por tenerlas previamente, pero no habrían sido necesarias, habría bastado con las pertenecientes a Topo-Iberia. Como ya se ha mencionado en varias ocasiones, los ficheros SINEX utilizados contienen las soluciones diarias con sus correspondientes matrices de covarianzas.

El marco de referencia en el que se apoya este trabajo es el IGB08 del IGS.

Una vez completados todos los procesos indicados, se introduce toda la información en el programa Bernese y se aplica el procesamiento explicado en el apartado anterior de la UJA para con Topo-Iberia. Indicar que el fichero SINEX indicado no se incluye aquí.

El resultado parcial al que se ha llegado es a las soluciones diarias obtenidas para las estaciones de la presa y las de Topo-Iberia, es decir, el fichero SINEX pertinente.

El siguiente paso es introducir en el software NEVE (DEVOTI, y otros, 2008) los ficheros SINEX, a saber, el recién obtenido y el facilitado por el equipo italiano.

Llegado este punto, el procesamiento está completo y toca extraer la información elaborada y suministrada como salida por el programa NEVE. Además de la información buscada como son las velocidades de desplazamiento de las estaciones (principal objeto de análisis de este trabajo), se tiene las estaciones consideradas fiduciales, las cuales materializan el marco de referencia. Éstas son: AJAC, BOR1, BUCU, CAGL, EBRE, GRAS, GRAZ, LAMP, MATE, NOT1, SFER, SJDV, ZIMM.

A continuación, se mostrarán unos gráficos de muestra de las estaciones fiduciales. En ellos se puede ver los resultados de las diferentes soluciones diarias (series temporales) a lo largo de 7 años de datos (2007-2013 inclusive). Se observa la tendencia claramente definida, también en la esquina superior derecha de los gráficos de cada coordenada se ve el valor obtenido de velocidad absoluta.

El resto de gráficas, listados y productos elaborados se mostrarán en el apartado siguiente como resultados.

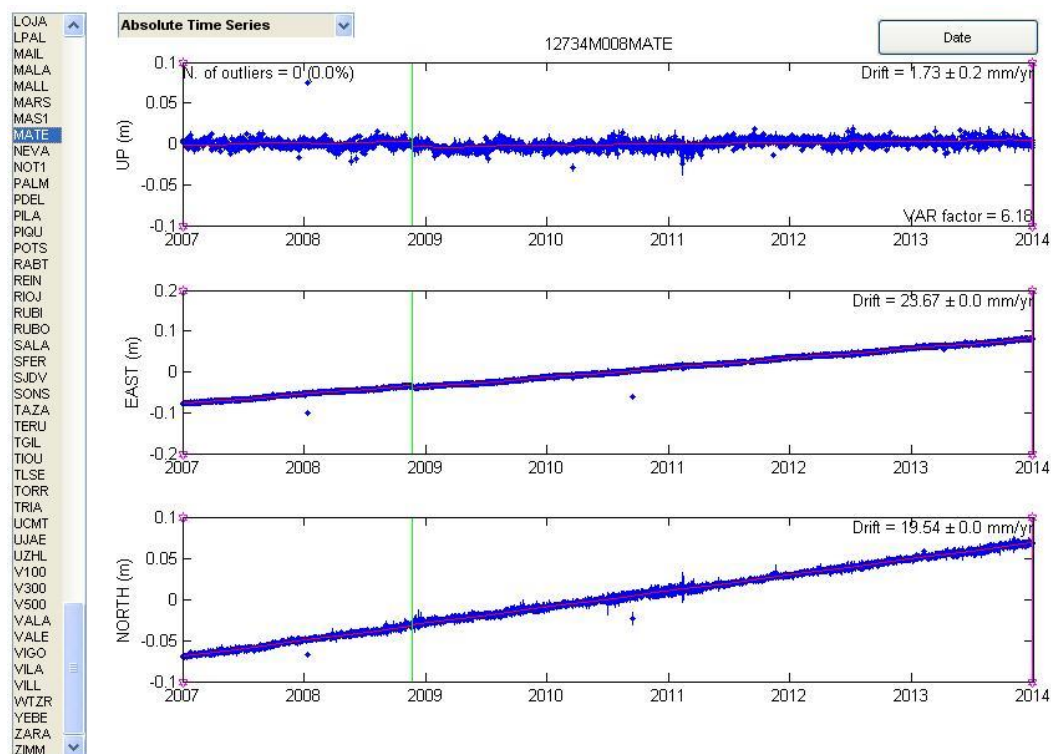


Figura 27.- Series temporales y velocidades de la estación MATE

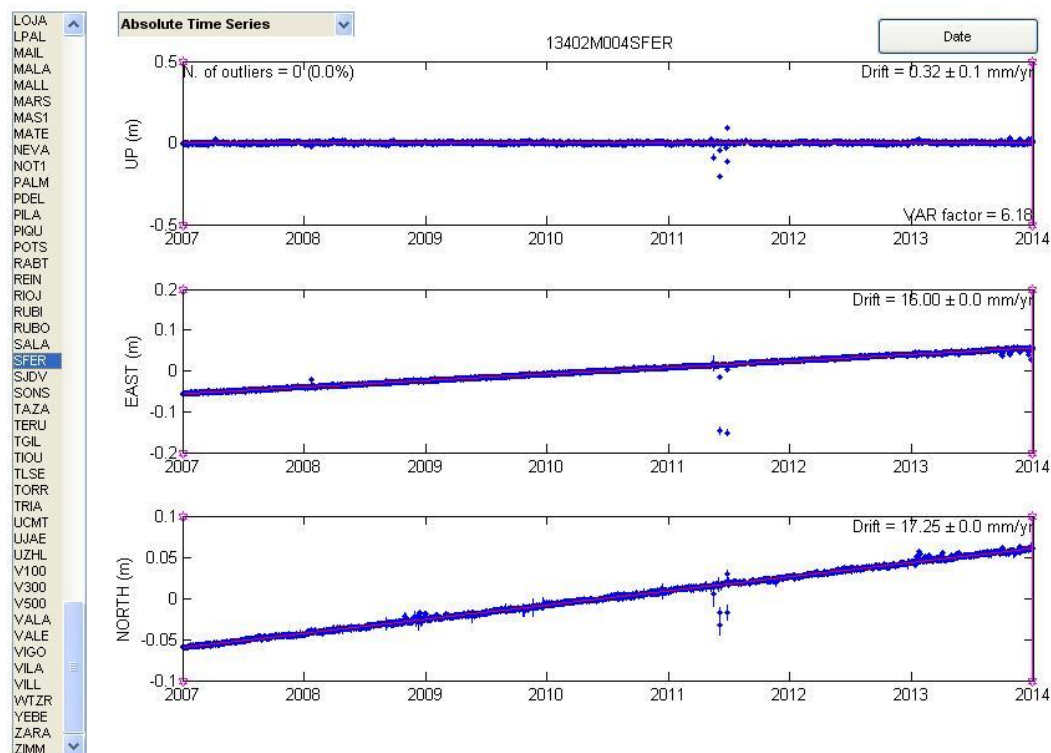


Figura 28.- Series temporales y velocidades de la estación SFER

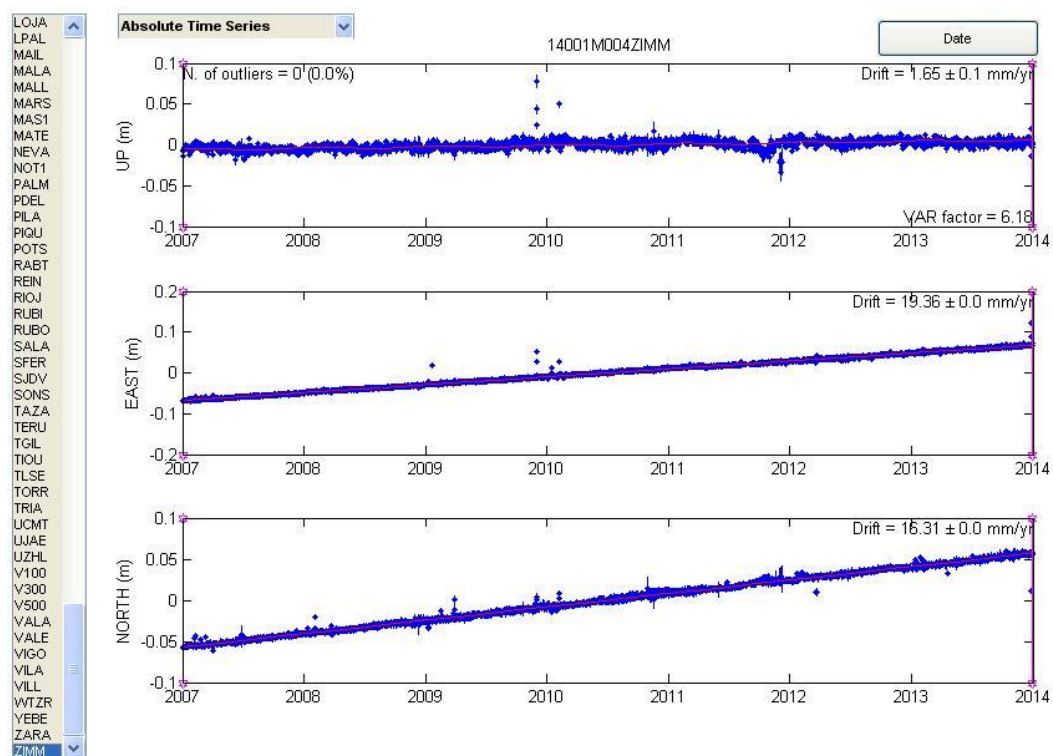


Figura 29.- Series temporales y velocidades de la estación ZIMM

## 5.- Análisis de Resultados y Conclusiones

A lo largo de este capítulo se mostrará los resultados obtenidos de las campañas de nivelación y GPS, además de analizarlos y extraer las principales conclusiones de los mismos.

### 5.1.- Nivelación

El primer punto de este epígrafe debe ser comprobar si los resultados de las diferentes nivelaciones están dentro de tolerancia. Para ello se muestra la siguiente tabla.

| <i><b>Campaña</b></i> | <i><b>Línea</b></i> | <i><b>Ida<br/>(m)</b></i> | <i><b>Vuelta<br/>(m)</b></i> | <i><b>Distancia<br/>(m)</b></i> | <i><b>Cierre<br/>(mm)</b></i> | <i><b>Tolerancia<br/>(mm)</b></i> | <i><b>S/N</b></i> |
|-----------------------|---------------------|---------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| <b>2014</b>           | A                   | -0.31543                  | 0.31529                      | 225.68                          | -0.14                         | 0.29                              | <b>S</b>          |
|                       | B                   | 0.81316                   | -0.81311                     | 648.71                          | 0.05                          | 0.48                              | <b>S</b>          |
|                       | C                   | 1.07667                   | -1.07669                     | 1263.21                         | -0.02                         | 0.67                              | <b>S</b>          |
| <b>2015</b>           | A                   | -0.31588                  | 0.31598                      | 225.43                          | 0.10                          | 0.28                              | <b>S</b>          |
|                       | B                   | 0.81285                   | -0.81275                     | 647.89                          | 0.10                          | 0.48                              | <b>S</b>          |
|                       | C                   | 1.07811                   | -1.07744                     | 1261.89                         | 0.67                          | 0.67                              | <b>S</b>          |

*Tabla 10.- Cierres y tolerancias de las nivelaciones 2014 y 2015*

La tolerancia se ha calculado conforme a la ecuación [3]. Todas nivelaciones pasan el test de la tolerancia de cierre, aunque la nivelación C de 2015 queda bastante ajustada de lo esperado a los requisitos establecidos.

La denominada línea CI no se ha incluido porque no se trata propiamente de una línea de nivelación como tal, realmente son observaciones radiadas desde la línea principal, en este caso la C.

Respecto a estos puntos de la línea CI, hay que destacar los resultados de la campaña de 2015. Al contrario que en el resto de la campaña y las anteriores, aparece un número importante de puntos que exceden la tolerancia. En campo se repitió cada uno de estos tramos en varias ocasiones sin conseguir hacer bajar los referidos cierres. También se debe indicar que los requisitos establecidos en

estos trabajos se encuentran sobre lo establecido en estos casos, donde la ecuación [3] pasaría a ser:

$$Tolerancia(k) = 0.9mm * \sqrt{k} \quad [4]$$

Considerando la ecuación [4], pasarían el test todos los tramos salvo el C53-CI53. Se repitió del orden de 4 veces el tramo, intercambiando miras, buscando reflejos que distorsionasen la medición, etc. Fue realmente imposible hacerlo entrar en tolerancia. Una posible razón sería la longitud tan corta del tramo, próxima a la distancia mínima de observación digital del nivel (1.8m). Aunque no mucho más corta que otros tramos de esta línea, además de observada correctamente en la campaña anterior. La teoría de la distancia corta no se pudo verificar puesto que no se realizó ninguna repetición forzando a una distancia mayor, sacando el nivel de la línea recta entre los dos puntos.

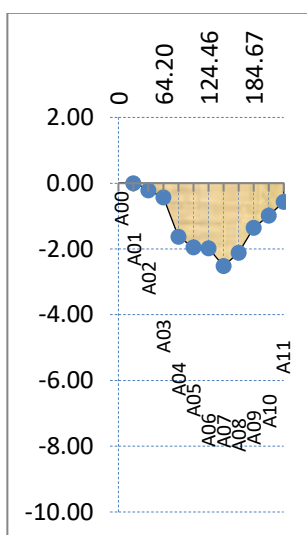


Figura 30.- Desplazamientos verticales de la línea A

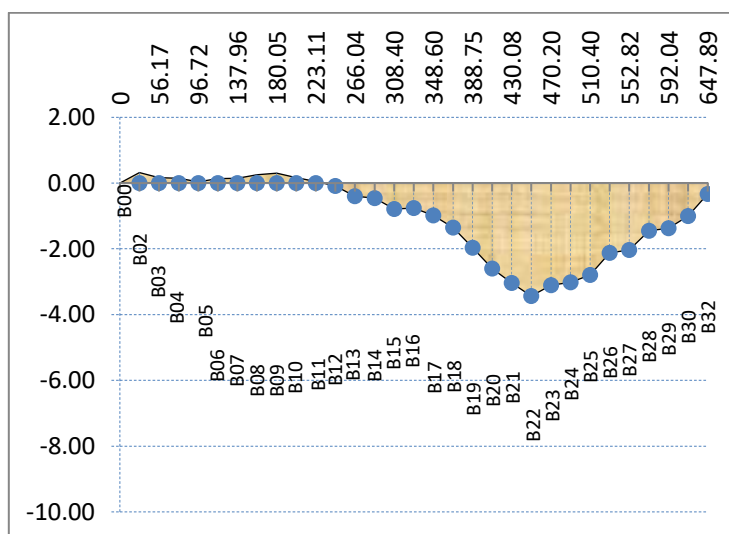


Figura 31.- Desplazamientos verticales de la línea B

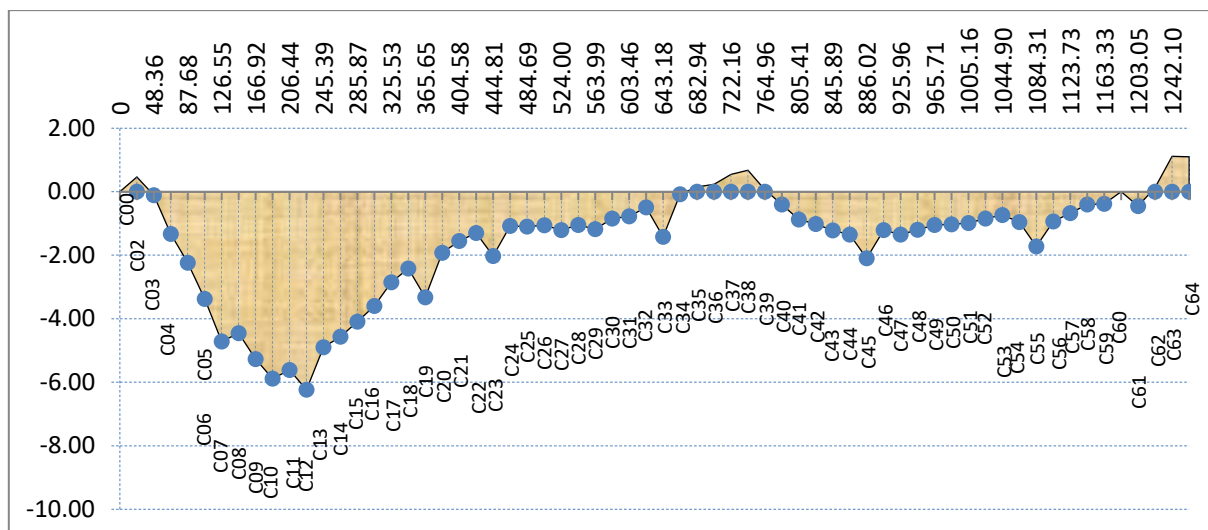


Figura 32.- Desplazamientos verticales de la línea C

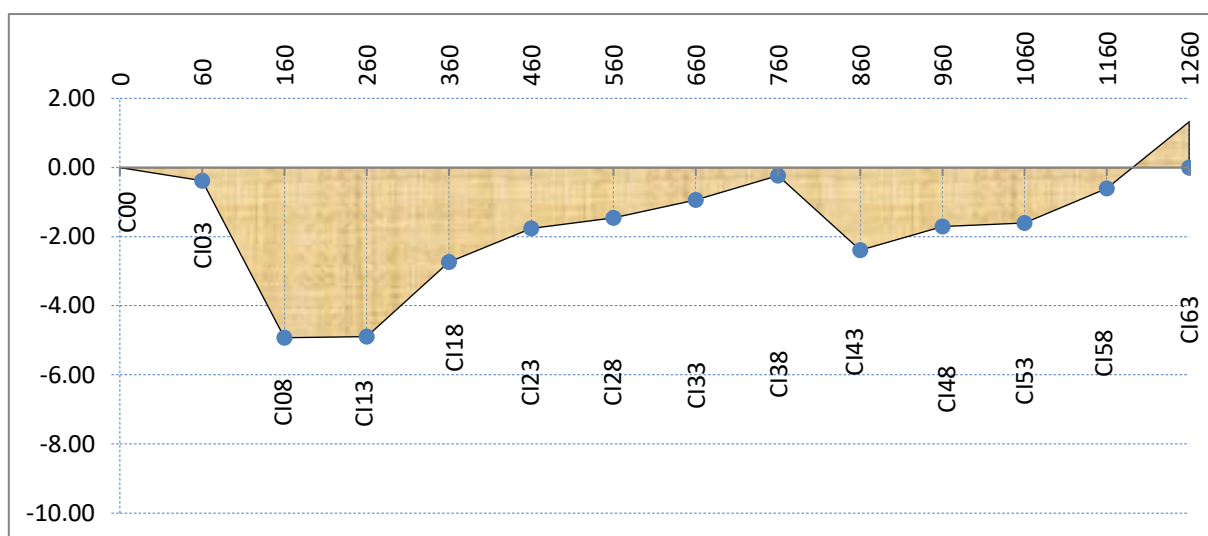


Figura 33.- Desplazamientos verticales de la línea CI

## 5.2.- GPS

El resultado principal obtenido tras el procesado completo de los datos es el correspondiente fichero de velocidades. En este caso no se está haciendo referencia a un fichero de velocidades absolutas, es decir, el valor del desplazamiento incluido el derivado del marco de referencia. Se trata de trabajar con las velocidades residuales, aquellas remanentes tras sustraerles los movimientos propios del sistema. Con los valores residuales se muestra el movimiento singular de cada punto respecto a los demás.

A partir de este momento, siempre que se haga referencia a velocidades se entenderá que se trata de las velocidades residuales, centro de este análisis.

Los puntos de control procesados han sido todos los observados. Si se presta atención a los puntos medidos en cada campaña, se extraerá un conjunto común. Con ese conjunto es con el que se trabaja para este proyecto. Se debe a que para poder calcular unos vectores de velocidad son necesarias más de dos campañas. Por tanto, sólo aquellos puntos observados tanto en 2008 como en 2013 servirán para este análisis.

| <b>Estaciones</b> | <b>Este</b>   | <b>Norte</b>  | <b><math>\sigma</math> Este</b> | <b><math>\sigma</math> Norte</b> | <b>corr E-N</b> |
|-------------------|---------------|---------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------|
|                   | <b>mm/año</b> | <b>mm/año</b> | <b>mm/año</b>                   | <b>mm/año</b>                    |                 |
| <b>V100</b>       | 0.4672        | 0.9363        | 0.5536                          | 0.5783                           | 0.1011          |
| <b>V300</b>       | 2.1334        | 4.0309        | 0.5632                          | 0.5929                           | 0.0968          |
| <b>V500</b>       | -4.0488       | 5.9020        | 0.5496                          | 0.5763                           | 0.1045          |
| <b>A05</b>        | -4.6416       | -6.4213       | 4.8998                          | 3.2779                           | -0.2779         |
| <b>A10</b>        | -4.7552       | -5.3401       | 2.1918                          | 3.0726                           | 0.0001          |
| <b>B00</b>        | 4.7676        | -1.4591       | 5.4808                          | 3.4776                           | 0.1952          |
| <b>B07</b>        | -3.1458       | 0.1994        | 5.8965                          | 3.5559                           | 0.1544          |
| <b>B15</b>        | -2.9391       | -3.0252       | 1.7984                          | 2.2844                           | 0.1924          |
| <b>B17</b>        | -4.2817       | -5.9158       | 5.9188                          | 3.4692                           | -0.0105         |
| <b>B22</b>        | -10.6783      | -14.9637      | 1.8569                          | 2.3929                           | 0.2235          |
| <b>B27</b>        | -8.2777       | -9.9934       | 1.9519                          | 2.4400                           | 0.2247          |
| <b>C00</b>        | -0.1125       | 1.2190        | 1.2742                          | 1.3707                           | 0.1069          |
| <b>C04</b>        | -8.3857       | 0.0861        | 1.3430                          | 1.5696                           | 0.1131          |
| <b>C07</b>        | -16.6356      | -15.1605      | 2.0634                          | 2.0742                           | -0.0157         |
| <b>C10</b>        | -11.3515      | -16.0323      | 1.4551                          | 1.9007                           | -0.0828         |
| <b>C15</b>        | -4.3985       | -11.8876      | 1.5056                          | 1.9126                           | 0.0185          |
| <b>C19</b>        | -1.6389       | -18.7727      | 1.3198                          | 1.5128                           | 0.1119          |
| <b>C23</b>        | 4.7854        | -9.2266       | 1.1089                          | 1.2131                           | 0.1119          |
| <b>C26</b>        | -0.9972       | -1.0717       | 1.3155                          | 1.6019                           | 0.1159          |
| <b>C28</b>        | -1.1463       | -1.0514       | 1.0487                          | 1.1286                           | 0.1269          |
| <b>C30</b>        | -0.6845       | -2.0702       | 1.4841                          | 1.7752                           | -0.0628         |
| <b>C37</b>        | 1.0116        | 0.2377        | 1.2953                          | 1.5676                           | 0.0985          |
| <b>C41</b>        | 0.9740        | 1.7606        | 1.6239                          | 2.0634                           | -0.3141         |
| <b>C45</b>        | -15.9893      | -3.5852       | 1.0867                          | 1.1502                           | 0.1288          |
| <b>C58</b>        | -1.2994       | -0.1392       | 1.3939                          | 1.7449                           | 0.0805          |
| <b>C64</b>        | -0.0080       | 1.2850        | 1.2659                          | 1.3593                           | 0.0652          |
| <b>CI03</b>       | -7.8537       | 1.7167        | 1.7354                          | 1.8821                           | -0.2028         |
| <b>CI08</b>       | -9.3195       | -9.0187       | 1.1329                          | 1.2139                           | 0.1312          |
| <b>CI13</b>       | -5.3553       | -12.2492      | 0.9932                          | 1.1368                           | 0.1519          |
| <b>CI18</b>       | 2.0676        | -4.9285       | 1.0957                          | 1.2191                           | 0.0694          |
| <b>CI23</b>       | -1.4456       | -4.4851       | 1.5710                          | 2.0693                           | -0.1997         |
| <b>CI28</b>       | -0.5299       | -1.4584       | 1.0139                          | 1.1559                           | 0.1697          |
| <b>CI33</b>       | -1.9326       | -2.9134       | 1.6128                          | 2.7720                           | -0.1409         |
| <b>CI38</b>       | 0.6902        | 0.5321        | 1.0746                          | 1.1997                           | 0.1120          |
| <b>CI43</b>       | 1.8180        | 2.7326        | 1.2314                          | 1.4755                           | 0.0815          |
| <b>CI48</b>       | 2.4547        | 1.8252        | 1.0278                          | 1.1618                           | 0.1416          |
| <b>CI53</b>       | -0.3929       | 1.7422        | 1.4322                          | 1.7574                           | -0.0556         |
| <b>CI63</b>       | 0.0991        | 0.6626        | 1.1638                          | 1.5514                           | 0.0614          |

Tabla 11.- Velocidades residuales de los puntos de control de la presa

El conjunto de puntos extraídos se muestra en la siguiente tabla, donde están acompañados por las componentes Este y Norte que definen el vector de velocidad y sus errores asociados.

Se hace necesario señalar que, ni en la tabla ni en el resto de resultados y análisis, aparecen los puntos de control A02, C12, C33 y C53. Se debe a que sus valores de error son excesivamente grandes y no aportan nada al estudio, salvo señalar que allí se ha producido algún tipo de problema durante alguna/s campaña/s.

Seguidamente se describirá cómo se han transformado esos valores relativos a los vectores de velocidad en unas figuras gráficas mucho más intuitivas a la hora de realizar análisis visuales globales.

Para la generación de los vectores y sus elipses de error asociadas se ha empleado el software [GMT versión 4.5.14](#). Consiste en un proyecto de código abierto muy empleado para la representación gráfica dentro del ámbito científico.

Los ficheros resultantes son en formato PostScript se han obtenido en la proyección UTM para poder utilizarlos posteriormente como se explicará a continuación. Para indicar las opciones utilizadas, se pondrá la línea con los comandos empleados para extraer los vectores de la línea C:

```
psvelo GMT_residuasPresa_C.dat -H2 -R-4.45/-4.435/38.015/38.03 -W1p,red  
-Gblack -Se0.015m/0.39/35 -JU30/100 -A0.1/0.75/0.5 -P -V > velo_UTM_C.ps
```

El siguiente paso ha consistido en convertir el formato PostScript en DXF, para ello se ha empleado el software [GSView 5.0](#) acompañado de [Ghostscript 9.19](#).

Por otra parte, mediante QGIS 2.12.3 se ha obtenido a través de una conexión WMS un recorte georreferenciado de la presa y su entorno en formato TIFF y su fichero asociado TIFFW. La imagen corresponde a la ortofotografía PNOA, extraída de la capa de máxima calidad, solicitada a:

<http://www.ign.es/wms-inspire/pnoa-ma?>

El montaje presentado en las siguientes figuras se ha realizado con el software AutoCAD. Con las coordenadas de los vértices V100 y V500 se ha escalado el DXF. Posteriormente se ha insertado la imagen georreferenciada y se han editado los colores y textos para configurar el aspecto que puede apreciarse en las figuras.

Con el fin de conseguir unas imágenes claras y útiles, se han realizado 4 imágenes independientes. El reparto de puntos de control en ellas ha quedado como sigue:

- Puntos correspondientes a las líneas A y B.
- Aquellos puntos de la línea C.
- Los de la línea CI.

- Conjunto completo de puntos sin sus textos identificativos.

Todas las figuras presentadas tienen la misma escala y el tamaño en el documento es idéntico. Es posible realizar comparaciones entre las diferentes figuras puesto que hacen referencia a iguales magnitudes.

La figura de los puntos de las líneas A y B presenta unos vectores nítidamente dirigidos en dirección aguas abajo. También se aprecia unas dimensiones mayores en aquellos puntos situados en las zonas con mayor altura de presa.



Figura 34.- Velocidades residuales en los puntos A y B

Algunas elipses son realmente grandes, destacando sobre las demás, sobre todo las de B00 y B07, además tienen unos movimientos completamente independientes del resto. Es necesario destacar que el punto B00 se encuentra muy próximo a una farola, no es el caso de B07, B17 y A05. Con la información actual, no es posible determinar si ha existido algún problema en alguna campaña o se trata de problemas asociados a la calidad de la señal recibida en esos puntos.

Otra muy probable razón sea el menor tiempo de observación realizado en las campañas de 2008 sobre esos puntos (sólo en 2013 fue homogéneo). Se está hablando de puntos observados 2 sesiones de 2 horas cada una.



Figura 35.- Velocidades residuales en los puntos C

Respecto a la figura de los puntos de la línea C, el primer comentario se dirige al comportamiento natural y esperado de una presa de materiales sueltos indicado con los vectores. Los vectores apuntan hacia la zona de mayor altura de la presa, además, en este caso se puede apreciar cómo los puntos periféricos a dicha zona se dirigen hacia ella simétricamente.

Se observa una disminución en los tamaños de las elipses de error respecto a la figura de los puntos de las bermas. Es previsible que la señal GPS se reciba con mayor limpieza en la coronación de la presa, además del mayor tiempo de observación como se ha comentado antes.

Fuera de la zona donde la presa es más alta, todos los puntos tienen unos vectores que no son significativos por ser inferiores a sus elipses de error. Existe una excepción con el punto C45, debe ser un punto para estudiar más a fondo en procesados posteriores. Su vector es desproporcionado frente a los que se muestran a su alrededor, incluso contrario a los puntos de aguas arriba como se verá en la siguiente figura. Previsiblemente se haya producido un error durante el registro de alguna de las campañas, un posible movimiento durante la adquisición de datos o, mucho menos probable, un estacionamiento fuera del punto.

En cuanto a la línea CI, los vectores presentan unas características acordes con las descritas para la línea C. Sólo destacar los vectores de CI43 y CI48, indican unas velocidades opuestas a la vista en la figura anterior para el punto C45.



Figura 36.- Velocidades residuales en los puntos CI

Para concluir la serie de figuras con los vectores de velocidad, la siguiente figura presenta todos los vectores considerados en las figuras anteriores. Se ha

eliminado los nombres de los puntos para simplificar el diseño y mostrar más limpiamente los vectores.

Aquí tan solo destacar la homogeneidad en los vectores salvo contadas excepciones ya comentadas en las figuras individuales.

En relación a los vértices, recordemos que estamos aquí principalmente por ellos, se han detectado unas elipses de error se semejen pequeños. Esto nos indica que las observaciones han sido estadísticamente de calidad, también como consecuencia de su centrado forzoso y sus tiempos de observación tan prolongados frente al resto.

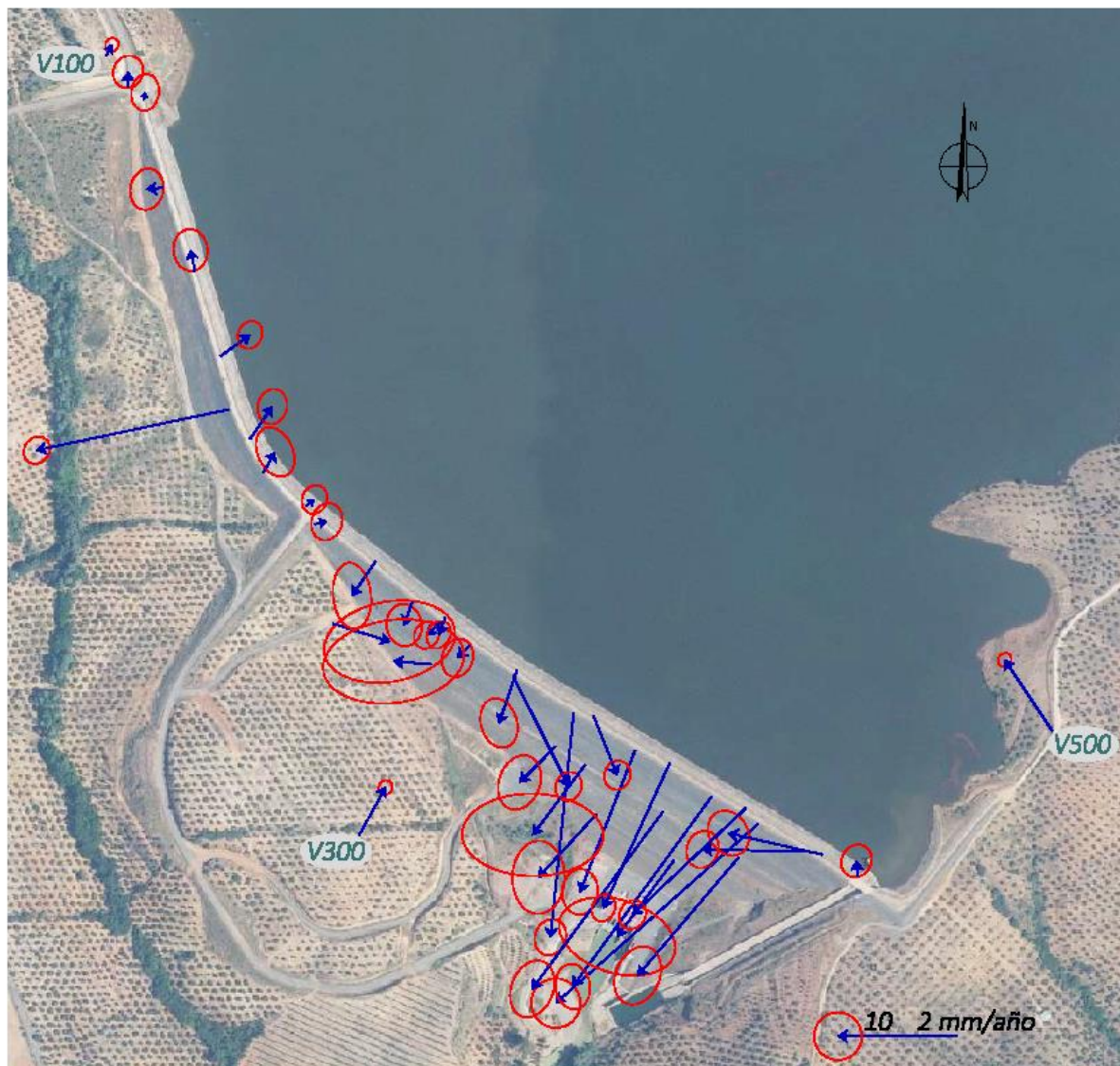


Figura 37.- Velocidades residuales de todos los puntos

Otro aspecto a destacar de los vértices es la comprobación de que V300 y V500 tienen unos desplazamientos importantes, los cuales imposibilitan su consideración de estables. Se trata de la confirmación a los peores augurios

señalados por el compañero Óscar Franco en su proyecto fin de carrera de la Ingeniería Técnica en Topografía (FRANCO-MORENO, 2009).

Por fortuna y también confirmando otras conclusiones de dicho proyecto, V100 sí puede considerarse estable. Al igual que el punto C00, también destacado en el citado proyecto como posible punto estable dentro de la red. Éste último tiene la desventaja de requerir un estacionamiento en trípode y encontrarse sobre hormigón, dificultando mucho su fijación para observaciones prolongadas. Es un punto muy expuesto al viento por encontrarse en la coronación.

Como complemento a los vectores se presentan a continuación las series temporales de 3 puntos, gráficos análogos a los mostrados con anterioridad para algunas de las estaciones fiduciales.

En primer lugar, indicar que las series temporales en estos casos son muy puntuales por las reducidas observaciones con que se cuenta. Aun así, se aprecia claramente en el punto C00 una gran continuidad de las series temporales, algo menos entre las dos primeras. Las campañas posteriores confirmarán o no la aparente estabilidad detectada en este trabajo.

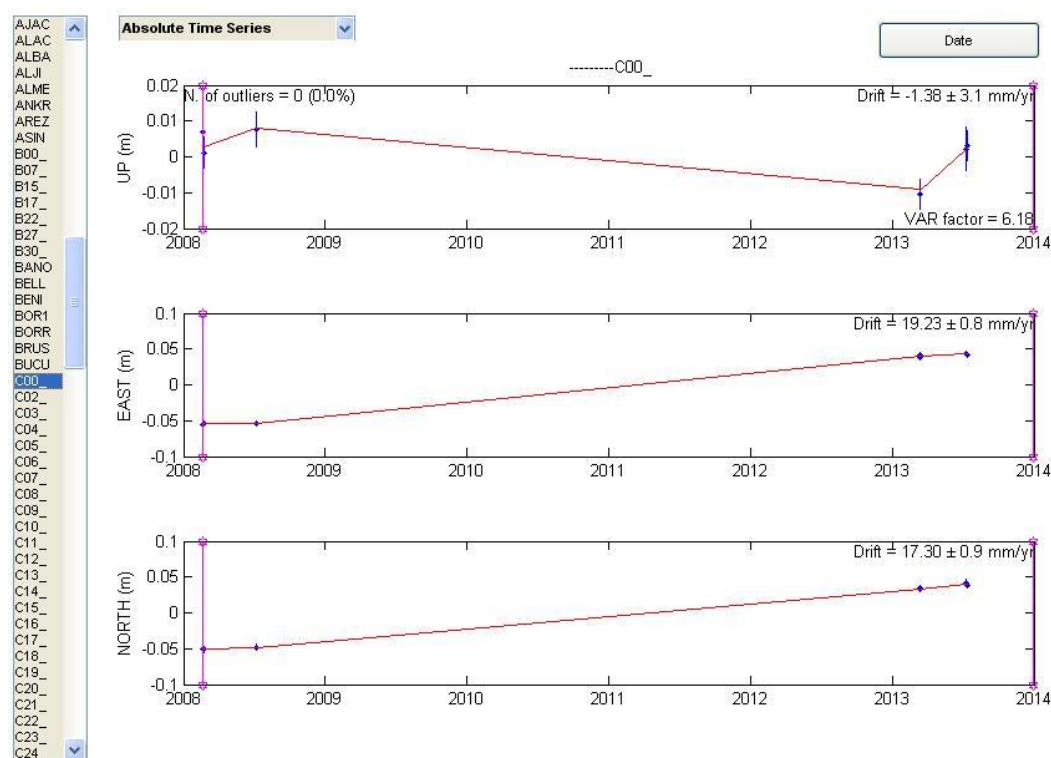


Figura 38.- Series temporales del punto C00

Por el contrario, la siguiente figura se ha incluido para presentar un ejemplo de punto que no muestra linealidad entre campañas separadas.

Como última figura, la relativa al vértice V100. Se aprecia una linealidad desde la primera campaña de 2008 hasta la última de 2013 tanto en Este como en Norte.

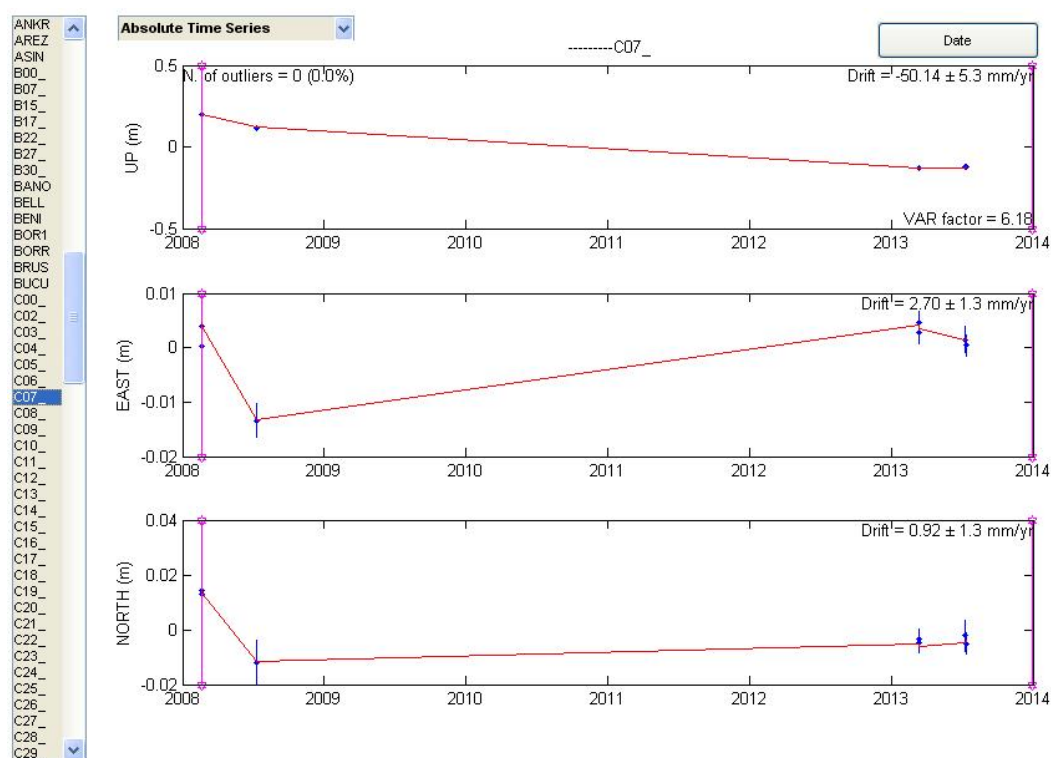


Figura 39.- Series temporales del punto C07

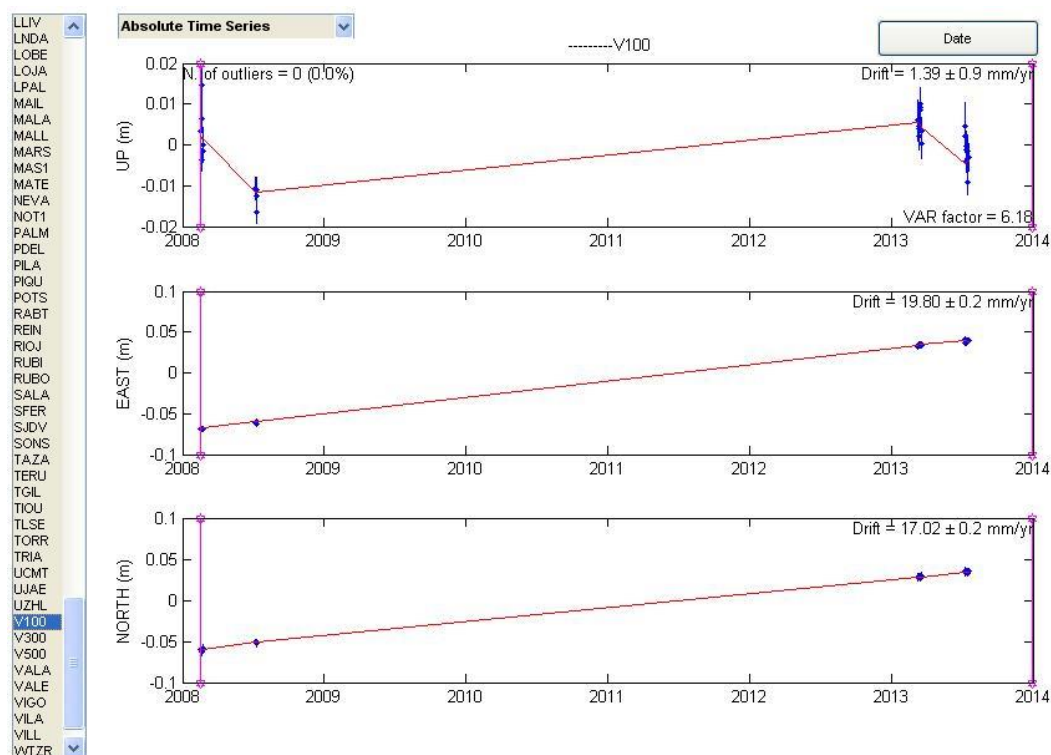


Figura 40.- Series temporales del vértice V100

Como es bien sabido, la componente de elevación en las observaciones GPS está sujeta a los mayores errores. Se han dejado esos análisis e interpretaciones a los datos adquiridos con el nivel digital.

### 5.3.- Conclusiones

Para finalizar el trabajo se presentará un compendio de conclusiones extraídas de los resultados y análisis de los datos procesados.

#### 5.3.1.- Nivelación

De la nivelación de las diferentes líneas se desprende que el asentamiento de la presa se ha ralentizado. Se ha pasado de los aproximadamente 45mm entre las campañas de 2013 (4 meses) a los menos de 7mm entre la campaña de 2014 y la de 2015 (13 meses). La proyección con la velocidad vertical de 2013 habría sido un desplazamiento de 135mm.

Los mayores desplazamientos se producen en la zona de mayor altura de tierras, con algunos puntos pronunciados que sobresalen de la tendencia del conjunto. Esto último se observa exclusivamente en la línea C y se presenta desde las campañas del 2008, donde estos picos eran mucho más pronunciados.

Sería necesario estudiar la posibilidad de realizar algún tipo de compensación por los errores detectados en los cierres. El reparto del error no sería considerable si se observa por tramo, pero el acumulado puede suponer cerca de 0.5mm.

Respecto a los problemas encontrados con el punto CI53, será necesario realizar nuevas observaciones en el tramo para ver si vuelve a surgir el problema. Aparte de la prueba de aumentar la distancia saliendo de la línea recta entre los clavos, se podría volver a calcular el error de colimación. Si las condiciones atmosféricas han cambiado mucho respecto al momento en que se realizó la calibración de este error, se puede estar forzando una situación complicada, agravada por la reducida distancia.

#### 5.3.2.- GPS

El punto más destacado de esta parte del trabajo es la verificación de la utilidad de los métodos de control de deformaciones geodésicas en la ingeniería civil. Ha quedado demostrado que las redes GNSS permanentes pueden ser explotadas para actividades cotidianas como la auscultación de grandes estructuras.

Las redes tienen las observaciones a disposición de los usuarios y puede obtenerse grandes beneficios si se consiguen explotar correctamente. Al estar registrando observaciones de forma continua, suponen una fuente de información muy importante.

En el caso que nos ha ocupado, el problema era importante puesto que la premisa de estabilidad en los vértices estaba en entredicho. La utilización de una red externa como ha sido en este caso Topo-Iberia ha permitido concluir que las

observaciones futuras deberán estar apoyadas en V100 y, probablemente, en C00. Esto permite el aprovechamiento de las campañas ya realizadas, en caso de no haber existido ningún punto estable, se habría tenido que comenzar prácticamente de cero con una nueva red externa. Con la red de estaciones permanentes ha sido gratis.

Probablemente el desconocimiento generalizado, cada vez menor, de este tipo de instrumentos es lo que lleva a su infrautilización. Se realizan multitud de pruebas, ensayos, investigaciones sobre aplicaciones novedosas que tardan demasiado en llegar al usuario de a pie.

Por otra parte, las sucesivas campañas permitirán incluir muchos de los puntos descartados hasta el momento por falta de observaciones. Al igual que los eliminados por poseer unas elipses de gran magnitud. Nuevas observaciones permitirán descartar la campaña o campañas que introducen problemas en dichos puntos.

También las nuevas campañas introducirán mayores y mejores razones para concluir si las elipses de mayor tamaño medio de las bermas son debidas al inferior número de observaciones o a su ubicación en un talud. Pienso que se trata de una combinación de ambas. Como en los valores extraños de B00 en planimetría cuando en altimetría no da muestras de ello.

Un aspecto a destacar de este trabajo es lo arriesgado de realizar observaciones tan prolongadas sobre un trípode. Por una parte, el largo tiempo aumenta las posibilidades de que se produzca un indeseado movimiento del trípode por un golpe de viento o un asentamiento diferencial de sus patas durante una jornada de lluvia. Por otra parte, dicho tiempo de observación facilita la detección de este tipo de problemas puesto que posibilitan estudios en profundidad de lo acontecido.



## Bibliografía

**AIUB.** Bernese GNSS Software. [En línea] Astronomical Institute, University of Bern, 2016. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <<http://www.bernese.unibe.ch/>>

**ALTAMIMI, Z., BOUCHER, C. y DUHEM, L.** The worldwide centimetric terrestrial reference frame and its associated velocity field. *Advances in Space Research* [en línea] 1993, Vol. 13, nº 11, págs. 151-160. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/027311779390218Z>>.

**ALTAMIMI, Z., COLLILIEUX, X. y MÉTIVIER, L.** Analysis and results of ITRF2008 [en línea] IERS Technical Note No. 37. 2012. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <[https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote37/tn37.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote37/tn37.pdf?__blob=publicationFile&v=1)>. ISBN: 978-3-86482-046-5.

**ALTAMIMI, Z., y otros.** ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. *Journal of Geophysical Research* [en línea] 2007, Vol. 112, nº B09401, . [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007JB004949/pdf>>.

**ALTAMIMI, Zuheir, COLLILIEUX, Xavier y MÉTIVIER, Laurent.** ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *Journal of Geodesy* [en línea] 2011, Vol. 85, nº 8, págs. 457-473. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <<http://download.springer.com/static/pdf/18/art%253A10.1007%252Fs00190-011-0444-4.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Farticle%2F10.1007%2Fs00190-011-0444-4&token2=exp=1472116432~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F18%2Fart%25253A10.1007%25252Fs00190-011-0444->>>.

**ALTAMIMI, Zuheir, SILLARD, Patrick y BOUCHER, Claude.** ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications. *Journal of Geophysical Research* [en línea] 2002, Vol. 107, nº B10, . [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2001JB000561/pdf>>.

**ALTAMIMI, Zuheir, y otros.** ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* [en línea] 2016, Vol. 121. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2016JB013098/epdf>>.

**ALTAMIMI, Zuheir, y otros.** The terrestrial reference frame and the dynamic Earth. *EOS* [en línea] 2001, Vol. 82, nº 25, págs. 273-284. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/EO082i025p00273-01/epdf>>.

**ARIAS, E.F., y otros.** The extragalactic reference system of the International Earth Rotation Service, ICRS. *Astronomy and Astrophysics* 1995, Vol. 303, págs. 604-608. Obtenido de

<[https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IER/Publications/tn/TechnNote23/tn23\\_4\\_013.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IER/Publications/tn/TechnNote23/tn23_4_013.pdf?__blob=publicationFile&v=1)>.

**AVILÉS, Manuel, y otros.** High-precision geodetic techniques applied to monitor deformations in the Arenoso dam (Spain). *IAG 2013: 150 years IAG, International Association of Geodesy Sci. Assembly* [poster] 2013. .

**BIAGI, Ludovico.** [ed.] M.A. BROVELLI y M. NEGRETTI. I fondamentali del GPS. *Geomatics Workbooks* [en línea] 2009, Vol. 8, pág. 246. [Último acceso: julio de 2014]. Obtenido de <<http://geomatica.como.polimi.it/workbooks/n8/>>. ISSN: 1591-092X.

**BIPM y USNO.** IERS Conventions Center. [En línea] 2015. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <<http://tai.bipm.org/iers/>>

**BOUCHER, C. y ALTAMIMI, Z.** Evolution of the realizations of the Terrestrial Reference System done by the BIH and IERS (1984-1988) [en línea] IERS Technical Note No. 04. 1990. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <[https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IER/Publications/tn/TechnNote04/tn04.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IER/Publications/tn/TechnNote04/tn04.pdf?__blob=publicationFile&v=1)>.

—. The IERS GPS Terrestrial Reference Frame [en línea] IERS Technical Note No. 10. 1992. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <[https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IER/Publications/tn/TechnNote10/tn10.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IER/Publications/tn/TechnNote10/tn10.pdf?__blob=publicationFile&v=1)>.

—. The initial IERS Terrestrial Reference Frame [en línea] IERS Technical Note No. 01. 1989. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <[https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IER/Publications/tn/TechnNote01/tn01.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IER/Publications/tn/TechnNote01/tn01.pdf?__blob=publicationFile&v=1)>.

**BOUCHER, C., ALTAMIMI, Z. y DUHEM, L.** Results and analysis of the ITRF93 [en línea] IERS Technical Note No. 18. 1994. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <[https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IER/Publications/tn/TechnNote18/tn18.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IER/Publications/tn/TechnNote18/tn18.pdf?__blob=publicationFile&v=1)>.

**BOUCHER, C., ALTAMIMI, Z. y SILLARD, P.** Results and analysis of the ITRF96 [en línea] IERS Technical Note No. 24. 1998. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <[https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IER/Publications/tn/TechnNote24/tn24.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IER/Publications/tn/TechnNote24/tn24.pdf?__blob=publicationFile&v=1)>.

—. The International Terrestrial Reference Frame (ITRF97) [en línea] IERS Technical Note No. 27. 1999. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <[https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IER/Publications/tn/TechnNote27/tn27.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IER/Publications/tn/TechnNote27/tn27.pdf?__blob=publicationFile&v=1)>.

**BOUCHER, C., y otros.** Results and analysis of the ITRF94 [en línea] IERS Technical Note No. 20. 1996. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <[https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IER/Publications/tn/TechnNote20/tn20.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IER/Publications/tn/TechnNote20/tn20.pdf?__blob=publicationFile&v=1)>.

**BOUCHER, Claude, y otros.** The ITRF2000 [en línea] IERS Technical Note No.31. 2004. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <[https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IER/Publications/tn/TechnNote31/tn31.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IER/Publications/tn/TechnNote31/tn31.pdf?__blob=publicationFile&v=1)>. ISBN: 3-89888-881-9.

**DACH, Rolf, y otros.** Bernese GPS Software - Versión 5.0 [en línea] Astronomical Institute, University of Bern (AIUB). 2007. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <<http://www.bernese.unibe.ch/docs50/DOCU50.pdf>>.

**DE LACY, M. Clara, y otros.** Red GPS Topo-Iberia: Resultados obtenidos en el Centro de Análisis de la UJA. *Física de la Tierra* [en línea] 2014, Vol. 26, págs. 25-33. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <<http://revistas.ucm.es/index.php/FITE/article/view/46969>>. ISSN: 0214-4557.

**DEVOTI, Roberto, y otros.** New GPS constraint on the kinematics of the Apennines subduction. *Earth and Planetary Science Letters* [en línea] 2008, Vol. 273, nº 1-2, págs. 163-174. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X08004019>>.

**DOW, John M., NEILAN, R. E. y RIZOS, C.** The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite System. *Journal of Geodesy* [en línea] 2009, Vol. 83, nº 3, págs. 191-198. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <<http://download.springer.com/static/pdf/824/art%253A10.1007%252Fs00190-008-0300-3.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Farticle%2F10.1007%2Fs00190-008-0300-3&token2=exp=1472155968~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F824%2Fart%25253A10.1007%25252Fs00190-008-0300-3>>.

**FRANCO-MORENO, Óscar Daniel.** Control de deformaciones de la Presa El Arenoso (Córdoba) [papel] Universidad de Jaén. Proyecto Fin de Carrera de Ingeniería Técnica en Topografía. 2009. .

**GALEN, Scott.** Precise Digital Leveling - Section 3: Collimation Check and Field Notes [en línea] National Geodetic Survey (NGS), NOAA. 2009. [Presentación de Workshop].

**GARATE, J., y otros.** Topo-Iberia project: CGPS crustal velocity field in the Iberian Peninsula and Morocco. *GPS Solutions* [en línea] 2015, Vol. 19, nº 2, págs. 287-295. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <<http://link.springer.com/article/10.1007/s10291-014-0387-3>>.

**GGFC.** Global Geophysical Fluid Center. [En línea] 2015. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <<http://geophy.uni.lu/>>

**IAU.** Resolution adopted at the XXIIIrd General Assembly of the IAU [en línea] Kyoto (Japón). 1997. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <[https://www.iau.org/static/resolutions/IAU1997\\_French.pdf](https://www.iau.org/static/resolutions/IAU1997_French.pdf)>.

— Resolution adopted at the XXIIInd General Assembly of the IAU [en línea] La Haya (Países Bajos). 1994. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <[https://www.iau.org/static/resolutions/IAU1994\\_French.pdf](https://www.iau.org/static/resolutions/IAU1994_French.pdf)>.

— Resolution adopted at the XXIst General Assembly of the IAU [en línea] Buenos Aires (Argentina). 1991. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <[https://www.iau.org/static/resolutions/IAU1991\\_French.pdf](https://www.iau.org/static/resolutions/IAU1991_French.pdf)>.

— Resolution adopted at the XXIVth General Assembly of the IAU [en línea] Manchester (Reino Unido). 2000. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <[https://www.iau.org/static/resolutions/IAU2000\\_French.pdf](https://www.iau.org/static/resolutions/IAU2000_French.pdf)>.

— Resolution adopted at the XXVIth General Assembly of the IAU [en línea] Praga (República Checa). 2006. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <[https://www.iau.org/static/resolutions/IAU2006\\_French.pdf](https://www.iau.org/static/resolutions/IAU2006_French.pdf)>.

**IAU, Division 1 Working Group.** IAU 2006 NFA Glossary (latest revision: 20 nov. 2007). [En línea] 2007. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <[http://syte.obspm.fr/iauWGnfa/NFA\\_Glossary.html](http://syte.obspm.fr/iauWGnfa/NFA_Glossary.html)>

**ICRS.** ICRS Product Center. [En línea] 2009. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <<http://hpiers.obspm.fr/icrs-pc/>>

—. ICRS Centre. [en línea] [aut. libro] IERS. [ed.] Wolfgang R. DICK y Daniela THALLER. En: IERS Annual Report 2014. Frankfurt, 2014.págs. 91-109 [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <[https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/ar/ar2014/ar2014\\_354.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/ar/ar2014/ar2014_354.pdf?__blob=publicationFile&v=3)>. ISSN: 1029-0060.

**IERS.** International Earth Rotation and Reference Systems Service. [En línea] 2013. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <<https://www.iers.org>>

—. IERS Conventions (2010) [en línea] IERS Technical Note No. 36. [ed.] Gérard Petit y Brian Luzum. 2010. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <[https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote36/tn36.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote36/tn36.pdf?__blob=publicationFile&v=1)>. ISSN: 1019-4568.

**IERS\_EOC.** IERS Earth Orientation Centre. [En línea] 2016. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <<https://hpiers.obspm.fr/eop-pc>>

**IGS.** IGS - International GNSS Service. [En línea] 2016. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <<http://www.igs.org>>

—. IGS Site Guidelines [en línea] . [ed.] Infrastructure Committee Central Bureau. 2015. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <[http://kb.igs.org/hc/en-us/article\\_attachments/202277487/IGS\\_Site\\_Guidelines\\_July\\_2015.pdf](http://kb.igs.org/hc/en-us/article_attachments/202277487/IGS_Site_Guidelines_July_2015.pdf)>.

**ITRF.** The International Terrestrial Reference Frame (ITRF). [En línea] 2016. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <<http://itrf.ign.fr/>>

**ROMERO, Francisco, y otros.** La Presa del Arenoso. *Revista de Obras Públicas* [electrónico] 2007, nº 3475, págs. 149-160. . ISSN: 1695-4408.

**SANCHO, Fernando, FERNÁNDEZ-PALACIOS, José M<sup>a</sup> y MARTÍN, María Isabel.** Presa del Arenoso. Presas y Embalses de Andalucía. [En línea] Universidad de Sevilla y Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio (Junta de Andalucía), 2015. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <<http://www.presasyembalsesdeandalucia.es/presas/arenoso/>>

**TOPOIBERIA.** TOPO-IBERIA. [En línea] 2014. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <<http://www.igme.es/Topolberia>>

**USNO.** Earth Orientation - Naval Oceanography Portal. Naval Oceanography Portal. [En línea] 2016. [Último acceso: agosto de 2016]. Obtenido de <<http://usno.navy.mil/USNO/earth-orientation>>